



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VYUŽITÍ STLAČENÉHO VZDUCHU PRO AKUMULACI  
ENERGIE**

USE OF COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Theodore Nicolas Laca

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

**BRNO 2017**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Theodore Nicolas Laca**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci energie

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je shromáždění informací o možnostech akumulace energie v podobě stlačeného vzduchu. Součástí práce by měla být i jednoduchá simulace motoru na stlačený vzduch. Teoretické základy termodynamiky plynů, praktické aplikace stlačeného vzduchu, akumulační systémy na stlačený vzduch u nás a ve světě, simulace chodu jednoduchého motoru na stlačený vzduch.

### Cíle bakalářské práce:

Základní rešerše o akumulaci energie zejména elektrické. Termodynamický rozbor akumulace elektřiny do stlačeného vzduchu. Rešerše různých konstrukčních řešení. Perspektivy využití. Text práce v rozsahu 20 až 30 stran, obrázky, tabulky.

### Seznam literatury:

ÇENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. 2015. Thermodynamics an engineering approach. 8. New York: McGraw-Hill, 1115 s. ISBN 978-0-07-339817-4.

WU, Chih. 2004. Thermodynamic cycles: computer-aided design and optimization. New York: Marcel Dekker, x, 424 s. ISBN 08-247-4298-2.

ZOBAA, Ahmed Faheem. 2013. ENERGY STORAGE – TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS. Novi Sad: InTech. ISBN 978-953-51-0951-8.

ZITO, Ralph. c2010. Energy storage: a new approach. Salem: Scrivener. ISBN 978-0-470-62591-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

V rešeršnej časti je spracovaný základný prehľad o význame a prínose akumulácie elektrickej energie. Popisuje hlavné možnosti akumulácie elektrickej energie, rozdelené podľa formy skladovania. Zahrňuje poznatky z termodynamiky pri kompresii a expanzii ideálneho plynu (vzduchu). Stručne popisuje praktické aplikácie stlačeného vzduchu. Ďalej sa zameriava na akumuláciu energie pomocou stlačeného vzduchu (CAES). Obsahuje základnú simuláciu motora na stlačený vzduch. Záver sa zaoberá prevažne perspektívami využitia CAES.

## **ABSTRACT**

In the search part is elaborated a basic overview of the importance and benefits of electricity storage. It describes the main possibilities of electricity storage, divided by the form of storage. It includes knowledge of thermodynamics in compression and expansion of ideal gas (air). It briefly describes practical applications of compressed air. Further, it focuses on compressed air energy storage (CAES). It contains a basic simulation of the compressed air engine. The conclusion deals mainly with the prospects of using CAES.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Akumulácia energie, Stlačený vzduch, , CAES, Termodynamický rozbor

## **KEYWORDS**

Accumulation of energy, Compressed air, CAES, Thermodynamic analysis

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

LACA, T. N. *Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 59 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D..

# PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Využití stlačeného vzduchu pro akumulaci energie** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

V Brne dňa 22.5.2017

.....

Theodore Nicolas Laca

# POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za cenné pripomienky, rady a za obzvlášť ochotný prístup pri vypracovaní bakalárskej práce.

Ďalej by som chcel poďakovať Mgr. Jane Golhovej za pomoc pri gramatickej korektúre.



# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 AKUMULÁCIA ENERGIE .....</b>	<b>12</b>
1.1 FORMY A DRUHY ENERGIE .....	12
1.2 AKUMULÁCIA ELEKTRICKEJ ENERGIE .....	13
1.2.1 Prečerpávacie vodné elektrárne (PHS) .....	15
1.2.2 Batériové úložiská .....	17
1.2.3 Prietokové batérie (FBES).....	19
1.2.4 Zotrvačnickové úložiská (FES) .....	21
1.2.5 Superkondenzátory (SES) .....	22
1.2.6 Supravodivé magnetické akumulátory (SMES) .....	24
1.2.7 Palivové články - vodíkové úložiská (HES).....	25
1.2.8 Tepelné úložiská (TES) .....	26
1.2.9 Akumulačné systémy na stlačený vzduch (CAES) .....	27
<b>2 TEORETICKÉ ZÁKLADY TERMODYNAMIKY PLYNOV.....</b>	<b>28</b>
2.1 IDEÁLNY PLYN (VZDUCH) .....	28
2.1.1 Vratné termodynamické deje.....	29
2.1.2 Carnotov cyklus.....	32
2.2 KOMPRESORY .....	33
2.2.1 Ideálne jednostupňové kompresory .....	33
2.2.2 Kompresory so škodlivým priestorom .....	34
2.3 PNEUMATICKÉ MOTORY.....	35
2.3.1 Pneumatický valec s piestom.....	36
<b>3 PRAKTICKÉ APLIKÁCIE STLAČENÉHO VZDUCHU .....</b>	<b>38</b>
3.1 ENERGETICKÉ APLIKÁCIE .....	38
3.1.1 Pneumatické náradie.....	38
3.1.2 Pneumatické brzdy .....	39
<b>4 AKUMULAČNÉ SYSTÉMY NA STLAČENÝ VZDUCH (CAES) .....</b>	<b>41</b>
4.1 GEOLOGICKÉ PODMIENKY.....	41
4.2 AKUMULAČNÉ SYSTÉMY VO SVETE .....	43
4.2.1 Huntorf .....	43
4.2.2 McIntosh.....	43
4.2.3 Norton.....	44
4.2.4 APEX Bethel .....	44
4.2.5 Adele.....	44
4.2.6 Larne.....	45
4.3 VÝSKUM A VÝVOJ .....	45
4.3.1 Zlepšené konvenčné CAES .....	45
4.3.2 AA-CAES.....	46
4.3.3 Malorozsahové CAES .....	46
<b>5 SIMULÁCIA CHODU JEDNODUCHÉHO MOTORA NA STLAČENÝ VZDUCH.....</b>	<b>48</b>
5.1 KOMPRESIA .....	48
5.2 AKUMULÁCIA V ZÁSOBNÍKU .....	49

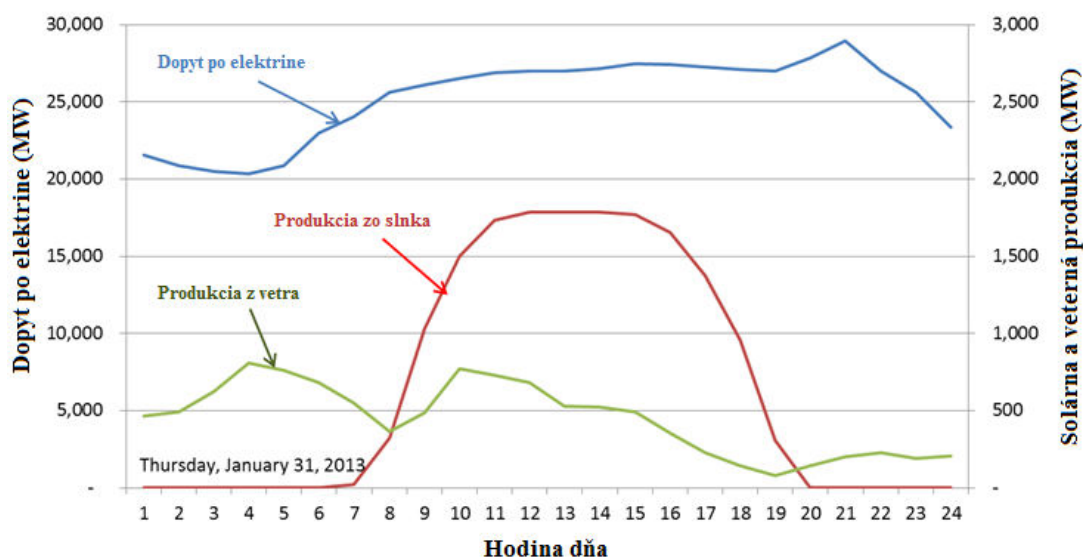
5.3	EXPANZIA (PNEUMATICKÝ MOTOR).....	49
<b>ZÁVER</b> .....		<b>51</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b> .....		<b>52</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK</b> .....		<b>57</b>

## ÚVOD

Akumulácia elektrickej energie je nevyhnutnou súčasťou pri celosvetovom trende nahradzovania fosílnych palív, k životnému prostrediu šetrnejšími a trvalo udržateľnými, obnoviteľnými zdrojmi energie (OZE). Hlavným dôvodom tejto zmeny je rastúci dopyt po elektrickej energii a tým aj potreba vyhovieť tejto požiadavke zvýšeného dopytu. Pri rozvojových krajinách je motiváciou nedostatočný zdroj financií na vybudovanie elektrární. Ďalším dôvodom je zmena charakteru elektrizačnej prenosovej sústavy vplyvom integrácie OZE, ktoré môžu spôsobiť ohrozenie bezpečnosti sústavy a zhoršenie kvality elektriny v sústave. Súčasťou budúcich systémov výroby energie budú OZE, ako sú veterné turbíny, fotovoltaické solárne systémy, solárna tepelná energia, elektrárne na biomasu, palivové články, plynové mikroturbíny, vodné turbíny, mikroturbíny s kombinovanou výrobou tepla a elektriny [1].

Využívanie OZE môže byť problematické aj pri priaznivých predpokladoch vzhľadom na nestabilnú dodávku z týchto zdrojov. Zvyšujúci sa záujem pre akumuláciu elektrickej energie je z nasledovných dôvodov: rast stochastickej výroby z OZE, stále napätie v elektrickej sieti a zvýšená potreba spoľahlivosti a bezpečnosti dodávok energie [2].

Medzi hlavné dôvody akumulácie ďalej patrí časový nesúlad medzi výrobou z OZE (napríklad z veterných elektrární) a energetickým dopytom. Dopyt je najvyšší v poobedňajších hodinách, kedy produkcia zo slnečných a veterných zdrojov nie je maximálna (obr. 1).



Obr. 1 Príklad hodinového dopytu, produkcia zo slnečnej a veternej energie počas zimy v Kalifornii [14]

# 1 AKUMULÁCIA ENERGIE

Akumuláciou energie sa rozumie priebeh, počas ktorého je využívaný určitý druh energie k uskladneniu za účelom opätovného využitia v budúcnosti. Využitie má v prípade, ak je k dispozícii menej výkonný zdroj v porovnaní s energetickými nárokmi dynamického systému. V tomto prípade dochádza k pomalému nabitíu akumulátora. Po nabití je proces vybíjania relatívne rýchlejší ako samotné nabíjanie a je splnená požiadavka výkonu. Ďalším prípadom je, ak systém vyžaduje väčšie množstvo energie ako je k dispozícii. V tom prípade sa využíva čas zníženého odberu k akumulácii prebytočnej energie, ktorá sa využíva v čase vyššieho dopytu, keď pokrytie samotným zdrojom by bolo nedostatočné [3].

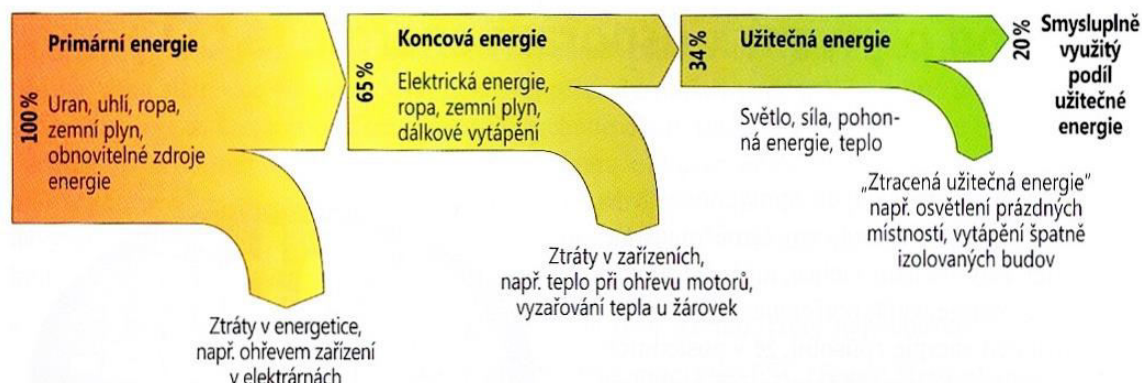
## 1.1 FORMY A DRUHY ENERGIE

K porovnaniu rozličných foriem energie je nutné rozlíšiť tieto tri základné formy (obr. 2):

**Primárna energia** v pôvodnej forme, získaná z prírody je väčšinou nedodávaná priamo spotrebiteľovi. Ide napr. o vytŕažené uhlie, prírodný zemný plyn, ropa a urán.

**Koncová energia** vo forme, v ktorej je dopravená ku spotrebiteľovi a pripravená k použitiu. Napríklad elektrická energia, tepelná energia a zemný plyn.

**Užitečná energia** zahrňuje konečnú formu energie pri užívaní. Príkladom je svetlo žiarovky, teplo k vytápaniu.



Obr. 2 Energetické straty spôsobené prenosom a premenou foriem energie [4]

Premena jedného druhu energie na druhý, resp. jednej formy na druhú súvisí vždy s chodom energetických strojov. Klasifikovanie energie podľa druhu:

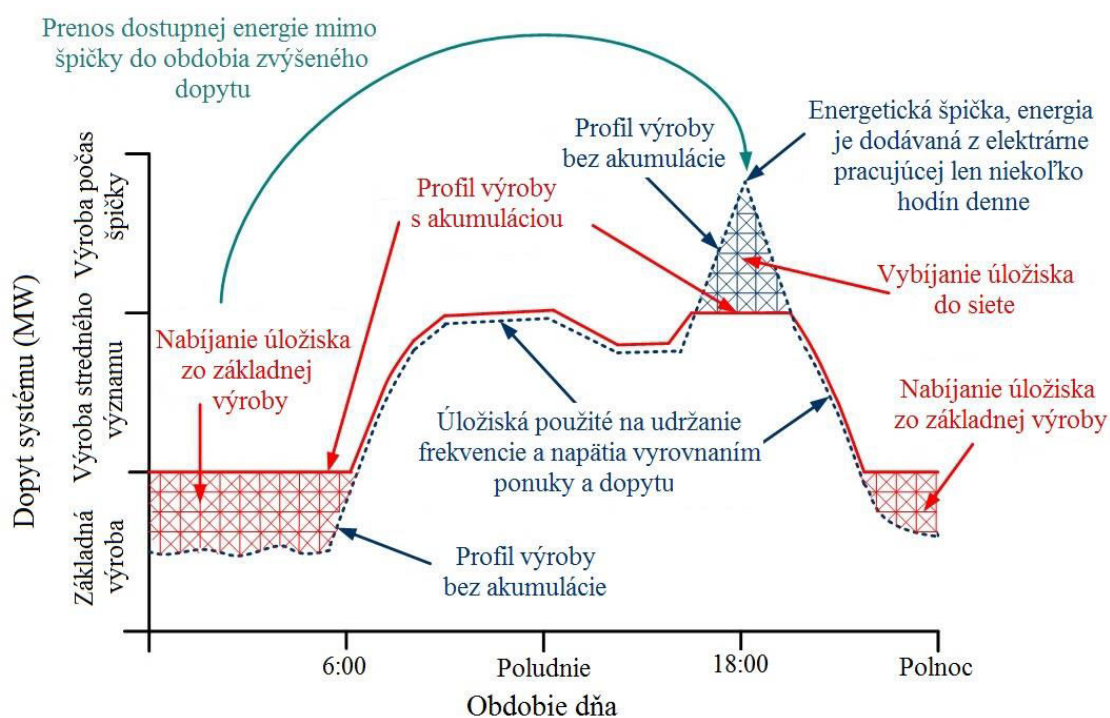
- Energia mechanická
- Energia tepelná
- Energia chemická
- Energia elektrická
- Energia poľa
- Energia jadrová

Pre formu energie je určujúci druh a nositeľ energie. Forma môže byť zdrojom niektorého druhu energie. Primárnym zdrojom a formou energie je napr. čierne uhlie. Iným prípadom je tepelná energia zostávajúca určitým druhom (formou) energie, hoci nositeľom môže byť vodná para, horúca voda a iné. Druhom a formou energie sú zároveň elektrická energia a energia poľa, kvôli čomu nepotrebujú nositeľa energie [5].

Za zadania vyplývajú sa práca v nasledujúcich častiach zaoberá prevažne elektrickou energiou.

## 1.2 AKUMULÁCIA ELEKTRICKEJ ENERGIE

Akumulácia elektrickej energie (AEE) je proces premeny elektrickej energie z elektrickej siete do formy, ktorá môže byť uložená a v prípade potreby je táto energia prevedená späť na elektrickú energiu. Takýto postup umožňuje produkciu elektrickej energie v čase nízkeho dopytu, nízkych výrobných nákladov alebo z nestabilných zdrojov energie a jej použitie v čase vysokého dopytu, pri vysokých výrobných nákladoch alebo keď nie je žiadny iný zdroj k dispozícii (obr. 3). AEE je použitá v rade aplikácií vrátane prenosných zariadení, dopravných prostriedkov [3].

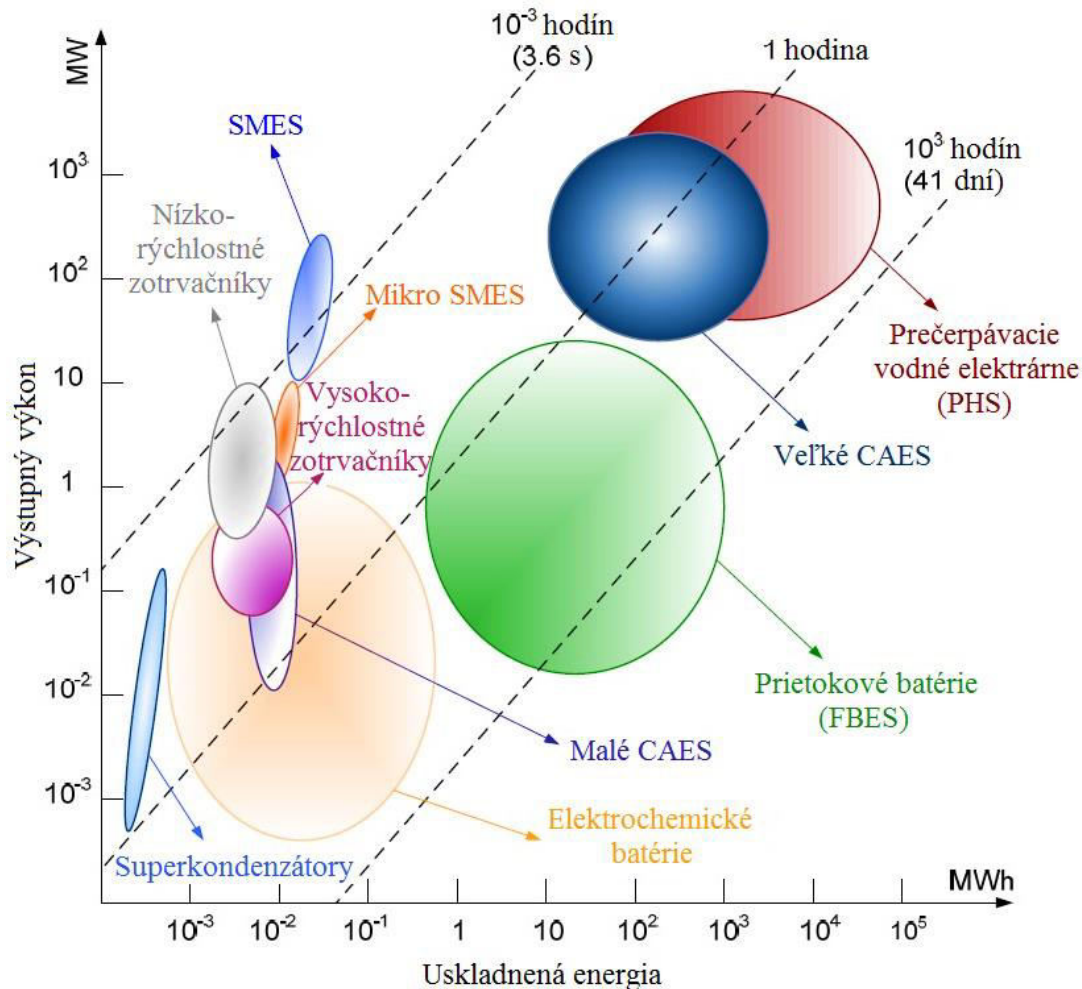


Obr. 3 Základná myšlienka skladovania energie [7]

Znižujúce sa náklady na AEE vplyvom pokroku v tejto oblasti môžu priniesť revolučné zmeny v konštrukcii a prevádzke elektrizačnej sústavy. Vplyv inovácií a integrácia akumulčných systémov môžu priniesť zmenšenie problémov počas energetických špičiek, stabilnejšiu elektrickú energiu a elimináciu porúch. Skladovanie energie má flexibilitu a multifunkčnú rolu v sieťovej dodávke elektrickej energie, čím sa zabezpečí účinnejšie riadenie dostupného výkonu. V kombinácii s výrobou energie z obnoviteľných zdrojov zabezpečujú akumulčné systémy elektrickej energie (ESS) v reálnom čase rovnováhu medzi produkciou a spotrebou. Zlepšujú tým riadenie a spoľahlivosť siete. Okrem toho ESS uľahčujú integráciu obnoviteľných zdrojov v energetickom systéme, zvyšujú rýchlosť prieniku energie a kvalitu dodávanej energie lepším ovládaním frekvencie a napätia. Skladovanie môže byť aplikované v elektrárni na podporu prenosovej sústavy, na rôznych miestach v distribučnej sústave a na špeciálnych prístrojoch a zariadení na strane zákazníka [1], [9].

ESS je možné použiť na zníženie špičkových zaťažení, a tým odstaviť prídavné tepelné elektrárne prevádzkované len počas energetických špičiek. Zvýši sa tým využitie trvalo prevádzkovaných elektrární a významne sa zníži emisia skleníkových plynov [10].

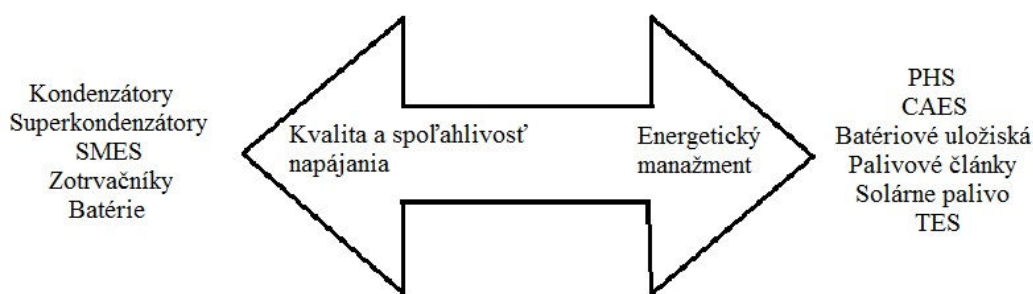
Prispôsobenie a uskutočniteľnosť vysoko efektívnych systémov si vyžaduje starostlivé prispôsobenie podľa typu aplikácie (obr. 4) (nízke až stredné množstvo elektrickej energie v izolovaných oblastiach, pripojenie do elektrifikačnej sústavy a iné) a na spôsobe výroby (permanentné, prenosné, z OZE a iné).



Obr. 4 Oblasti použitia rôznych akumulčných technológií podľa akumulovanej energie a výstupného výkonu [10]

Podľa funkcie sa ESS delia na tie, ktoré sú určené pre vysoké výkony s relatívne malým množstvom energie a na tie, ktoré sú vhodné pre kvalitatívne napájanie, napríklad superkondenzátory, SMES (supravodivé magnetické skladovanie energie) a zotrvačníky. Ďalej sú tu tie, ktoré zaisťujú energetické potreby siete, napr. PHS, CAES (obr. 5). Aj keď elektrickú energiu nie je možné jednoducho, priamo a lacno uložiť, môže sa relatívne lacno ukladať v iných formách a v prípade potreby previesť späť na elektrickú energiu [1].





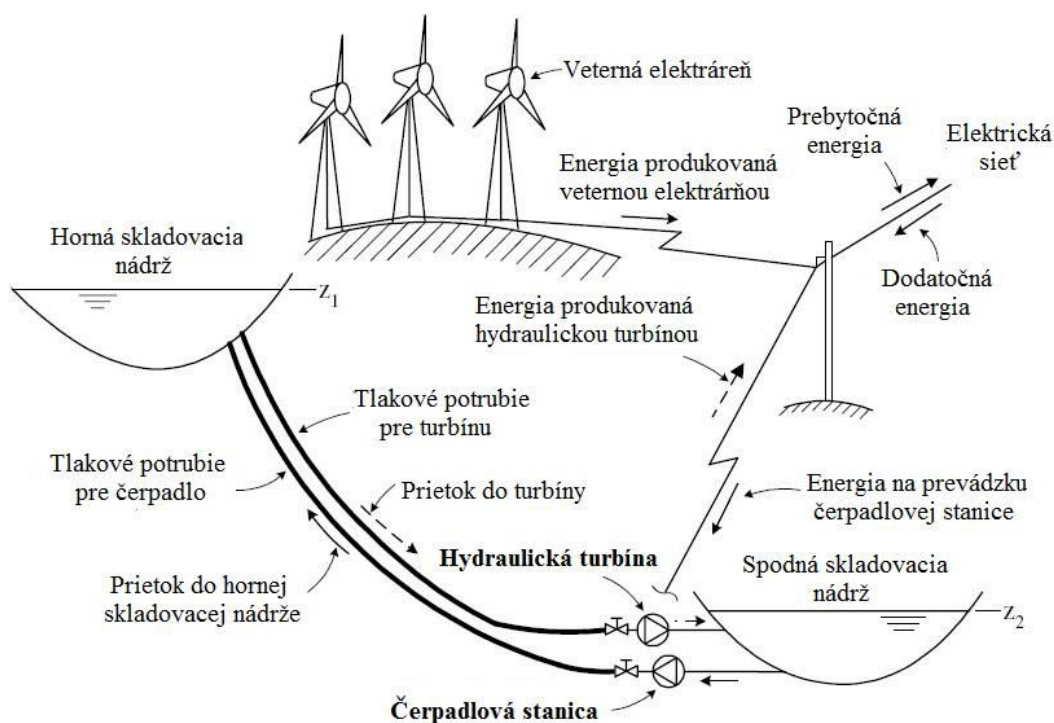
Obr. 5 Rozdelenie podľa funkcie [6]

Technológia akumulácie elektrickej energie môže byť ďalej klasifikovaná podľa formy skladovania [15]:

- a) Akumulácia elektrickej energie:
  - Elektrostatická energia, vrátane kondenzátorov a superkondenzátorov
  - Magnetická/prúdová energia, vrátane supravodivých magnetických akumulátorov (SMES)
- b) Akumulácia mechanickej energie:
  - Kinetická energia (zotrvačníky)
  - Potenciálna energia (prečerpávacie vodné elektrárne PHS a s využitím stlačeného vzduchu CAES)
- c) Akumulácia chemickej energie:
  - Elektrochemická energia (bežné batérie ako olovený akumulátor, Niklometalhydridový (NiMH) akumulátor, Lítium-iónový (Li-Ion) a prietokové redoxové (oxidačno-redukčné) batérie s elektrolytom na bázach zinku a brómu (ZnBr), vodíka a brómu (HBr) a ďalšie
  - Chemické skladovanie energie (palivové články, MCFC - palivový článok obsahujúci elektrolyt v podobe roztaveného uhličitanu alkalického kovu a batéria Metal-Air (kov-vzduch))
  - Termochemické uskladnenie energie (využitie fotovoltaiiky na výrobu vodíka elektrolyzou vody, využitie solárnej energie na výrobu kovov, disociácia/rekombinácia amoniaku (na vodík a dusík) a metánu)
- d) Akumulácia tepelnej energie:
  - Nízkoteplotná (studenovodné úložiská, kryogénne úložiská)
  - Vysokoteplotná (systémy s citeľným teplom ako napríklad zásobníky horúcej vody alebo pary, grafit, horúce skaly a betón, a systémy používajúce latentné teplo, napríklad materiály s fázovou premenou)

### 1.2.1 Prečerpávacie vodné elektrárne (PHS)

Prečerpávacie vodné elektrárne sú nevyhnutnou súčasťou elektrizačnej sústavy aj kvôli schopnosti krátkodobej a dlhodobej akumulácii elektrickej energie. Hlavnými časťami sú (obr. 6) dve veľké vodné nádrže, elektrický stroj (motorgenerátor), reverzné vodné turbíny alebo oddelene čerpadlá a turbíny.



Obr. 6 Ilustrácia hybridného systému skladovania energie využívajúci PHS a veternú elektrárňu [1]

Pri PHS predstavuje voda v pomerne vysokej nadmorskej výške potenciálnu (v hornej nádrži) alebo uskladnenú energiu. Počas energetickej špičky sa voda z hornej nádrže vedie potrubím dole na turbínu, ktorá poháňa generátor. Voda následne ústi do dolnej nádrže. Pri prebytku elektrickej energie v sieti (napríklad v noci) sa voda z dolnej nádrže prečerpáva do hornej nádrže. Využíva sa menej hodnotná elektrická energia prevažne z uhoľných alebo atómových elektrární, ktorá sa prostredníctvom čerpadla premieňa na kinetickú energiu prúdiacej vody a neskôr na potenciálnu (v hornej nádrži) [16]. Tento systém môže byť spustený v priebehu niekoľkých minút a jeho nezávislosť závisí na objeme skladovanej vody. Akumulačná kapacita je závislá od rozdielu výšok a objemovej kapacity vody v hornej nádrži. Ich efektívnosť konvertovania energie z hľadiska napájania siete je okolo 65-80 % v závislosti na účinnosti zariadení. Množstvo 1 t vody padajúca z výšky 100 m generuje 0,272 kWh [1]. PHS sú náročné na krajinné podmienky (veľké výškové rozdiely) a pomerne veľkú rozlohu, ktoré majú jej časti. V rovinách a husto osídlených oblastiach ich realizácia nie je ekonomicky výhodná [17]. Najväčšia PHS v prevádzke sa nachádza v Bath County vo Virgínii s výkonom 3003 MW/ 30 931 MWh. Celkový podiel PHS na celosvetovom inštalovanom výkone akumulačných zariadení je okolo 99 % [22].

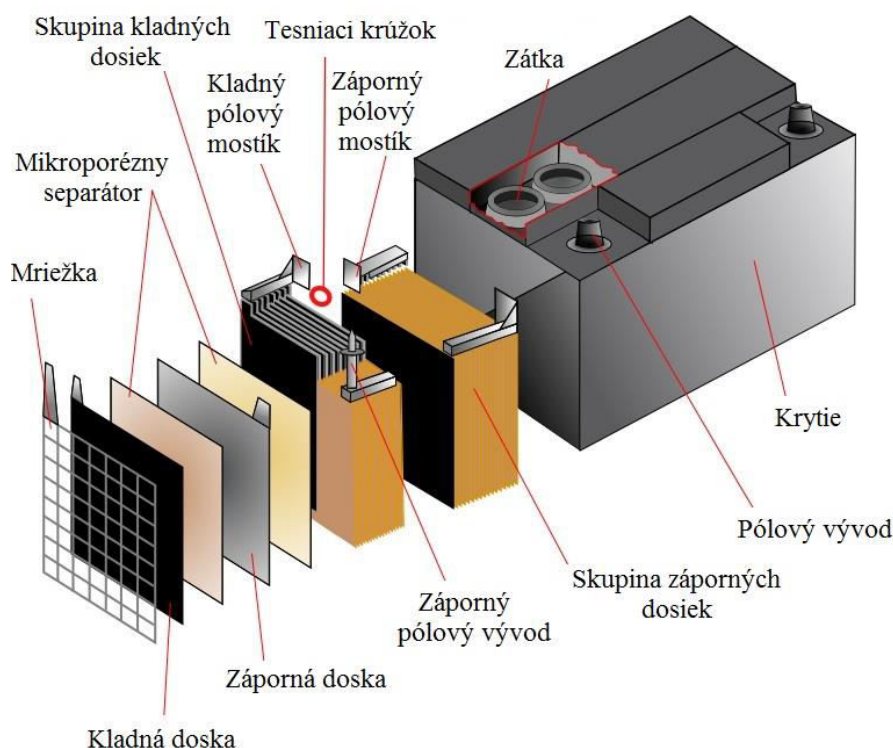
V súčasnej dobe sú v štádiu návrhu alebo skúšobnej prevádzke elektrárne využívajúce k prečerpávaniu morskú vodu. Realizácia prvého pilotného projektu sa uskutočnila v roku 1999, v japonskej Okinawe, s výkonom 30 MW. Súčasťou v styku s morskou vodou zabraňuje náter alebo využívajú katódovú ochranu. Medzi ďalšie štáty pracujúce na PHS s morskou vodou patria Írsko, Čile a Havaj [18], [19]. Ďalšou možnosťou je priame využitie veternej alebo solárnej energie k pohonu čerpadiel v PHS, čo môže priniesť vyššiu efektívnosť a zvýšiť stabilitu elektrizačnej sústavy. Medzi alternatívu využitia patrí aj použitie podzemných rezervoárov. Odhady ukazujú možnosť nižších nákladov v porovnaní s povrchovými projektami, ak by sa využili existujúce hlbinné priestory. Počet podzemných zásobníkov je výrazne obmedzený, ale ich počet sa po opustení dnes využívaných baní môže zvýšiť.



Ďalšou akumuláčnou technológiou využívajúcu prečerpávanie sa zaoberá vývojový a výskumný projekt StEnSEA (uložená energia v mori). Fyzikálny princíp je podobný ako pri konvenčných PHS. Základom avšak nie sú dve nádrže, ale dutá guľa s priemerom 30 m umiestnená na morskom dne približne v hĺbke 700 m. Hydrostatický tlak vytvára potenciálnu energiu. Cez otvor gule vtekajúca voda poháňa turbínu a generátor, ktorý premieňa kinetickú energiu na energiu elektrickú. V prípade prebytku elektrickej energie v sieti je voda z gule odčerpávaná. Komerčne pripravovaná veľkosť gule je okolo 20 MWh, čo predstavuje 4 h vybíjania s 5 MW čerpadlovou turbínou [20].

### 1.2.2 Batériové úložiská

Batériové úložiská pozostávajú zo sériovo, resp. paralelne zapojených sekundárnych (nabíjateľných) batérií. Batérie akumulujú energiu v elektrochemickej podobe vytvárajúc elektricky nabité ióny. Počas nabíjania batérie sa jednosmerný prúd premieňa na chemickú energiu a počas vybíjania sa chemická energia premieňa na tok elektrónov v podobe jednosmerného prúdu. Elektrochemický proces je založený na redoxnej vratnej reakcii. Batérie patria medzi najobľúbenejšie zariadenia k skladovaniu energie [1]. Pojem batérie v sebe zahŕňa niekoľko technológií, ktoré uplatňujú rôzne prevádzkové princípy a materiály. Bežné, komerčne dostupné sekundárne batérie podľa použitého elektrochemického systému je možné rozdeliť na štandardné (olovené (obr. 7), nikel-kadmiové), moderné (nikel-metalhydridové, Li-ion, kov-vzduch) a vysokoteplotné (sodíkovo-sírový, sodík-nikel-chlorid) [34].



Obr. 7 Konštrukčné usporiadanie hlavných častí olovenej batérie [33]

Ich hlavnou výhodou je ich energetická hustota vzhľadom na hmotnosť (až do 150-2000 Wh/kg) a technologická vyspelosť. Hlavnou nevýhodou je relatívne nízka životnosť týchto batérií, a to hlavne pri cykloch s hlbokým vybíjaním. Často sa používajú v prenosných zariadeniach, ale aj v trvalých aplikáciách ako sú záložné napájacie zdroje, pri skladovaní energie z obnoviteľných zdrojov v odľahlých oblastiach a iných.

Minimálny čas k vybitiu elektrochemických akumulátorov je zriedka nižší ako 15 minút, ale pri niektorých aplikáciách pre výkony až 100 W/kg (alebo aj niekoľko kW/kg) to môže byť dosiahnuteľné v priebehu niekoľkých sekúnd alebo minút. Na rozdiel od kondenzátorov je ich napätie stabilné nezávisle od stavu nabitia. Avšak počas vysokorýchlostného nabíjania pri takmer maximálnej kapacite a počas vybíjania pri minimálnej kapacite môže byť napätie rozličné až dvojnásobne [1].

## Olovené batérie

Olovené batérie sa zvyčajne skladajú z Pb alebo PbO elektród, ktoré sú ponorené do elektrolytu, ktorým je kyselina sírová (v nabitom stave). Pri vybíjaní sú prevedené na síran olovnatý a koncentrácia kyseliny sírovej sa znižuje, až sa z neho do značnej miery stane voda. V porovnaní s ostatnými elektrochemickými zdrojmi majú mnoho výhod. Tými sú nízka cena a dostupnosť olova, dobrá spoľahlivosť, vysoké svorkové napätie na jednom článku (2 V), vysoká elektrochemická účinnosť a cyklická životnosť od stoviek po tisíce cyklov. Kvôli týmto výhodám patria medzi najrozšírenejšie sekundárne elektrochemické zdroje elektrickej energie so 60 % podielom z celkového inštalovaného výkonu. Ich nevýhodou je hmotnosť olova a kvôli tomu nižšia merná energia 30-50 Wh/kg. Sú vhodné pre stredné až veľké aplikácie úložísk, kvôli priaznivej kombinácii silových parametrov a nízkej ceny [34]. Oproti Li-ion akumulátorom vynikajú odolnosťou voči nízkym teplotám, bezpečnosťou a cenou. Nevýhodou je ekologická záťaž Pb a Cd [31].

## Nikel-kadmiové (NiCd)

V nabitom stave je kladná elektróda NiCd akumulátora tvorená oxo-hydroxidom nikelnatým  $\text{NiO}(\text{OH})$ , ten sa pri vybíjaní pretvára na hydroxid nikelnatý. Pri vybíjaní sa záporná kadmiová elektróda počas reakcie s kyslíkom vytvára CdO. Častým elektrolytom je hydroxid draselný, rozpustený vo vode [34]. Napätie jedného článku je 1,2 V. V porovnaní s olovenými batériami majú zvyčajne o niečo vyššiu hustotu (okolo 50 Wh/kg), sú schopné tolerovať vysoko vybité stavy počas dlhšej doby a vyžadujú menšiu údržbu. Ich cyklická životnosť je trochu vyššia (do 2000 cyklov). Kvôli „pamäťovému efektu“ a nadmernému nabíjaniu si vyžadujú starostlivé riadenie nabíjacích cyklov. Rovnako ako pri olovených je otázkou ekologickej bezpečnosti je vynaloženie s toxickým kadmium z týchto batérii. Pamäťový efekt je spôsobený nedokončenými nabíjacími/vybíjacími cyklami [31].

## Nikel-metalhydridové (NiMH)

Batérie NiMH v značnej miere nahrádzajú NiCd batérie v prenosných znovunabíjateľných aplikáciách. Majú výrazne vyššiu hustotu energie ako NiCd (okolo 80 Wh/kg), predstavujú menší problém z ekologického hľadiska a sú lacnejšie. Hlavné nevýhody predstavujú vysoká miera samovybíjania a nízka cyklická životnosť. V súčasnosti sa používajú k rôznym sieťovým aplikáciám skladovania energie ako aj v hybridných vozidlách [31].

## Li-ion

Lítium-iónové batérie majú dominantné postavenie na trhu s malými prenosnými elektronickými zariadeniami vďaka svojej vysokej hustote energií (nad 150 Wh/kg), nízkej hmotnosti a vysokej účinnosti s menovitým napätím 3,6 V. Katódu akumulátora tvorí oxid kovu ( $\text{LiCoO}_2$ ) a anóda je vrstevnatej štruktúry z uhlíka. Elektrolyt je tvorený z lítiovej soli ( $\text{LiPF}_6$ ) rozpustenej v organickom karbonáte. Pri nabíjaní Li ióny migrujú do vrstvovej štruktúry uhlíkovej elektródy. Nedostatkom je ich vysoká cena, znižujúca sa životnosť pri hlbších vybíjaniach a neschopnosť úplného vybitia [36]. Miera

samovybíjania je okolo 5 % za mesiac. V automobilovom priemysle prevláda táto akumulačná technológia a tým aj cena sa drží na nízkej úrovni. V súčasnosti najvýkonnejší systém tohto druhu má kapacitu 48 MW/12 MWh [22]. V roku 2020 je plánované otvorenie úložiska (Escondido, Kalifornia) s doposiaľ najväčšou kapacitou 30 MW/120 MWh [35]. V súčasnosti prebieha výskum v nano meradle aj na zväčšení povrchu elektród.

## Kov-vzduch

Batérie kov-vzduch sú unikátne, pretože jedna z reakčných zložiek (vzduch) nie je uložená v batérii a to je dôvodom veľmi vysokej špecifickej hustote energie (laboratórne dosiahnutá 362 Wh/kg). Skladajú sa z exponovanej poréznej uhlíkovej elektródy (nazývanej vzduchová katóda) oddelenej od kovovej anódy elektrolytom. Katóda zachytáva atómy kyslíka zo vzduchu, ktoré reagujú s kladnými iónmi kovov z anódy. Technológia je stále vo vývoji [1].

## Sodíkovo-sírové (NaS)

Akumulátory NaS patria medzi vysokoteplotné akumulátory. Sodík má mnoho výhod ako materiál negatívnej elektródy podobne ako lítium. Použitý je v kvapalnej forme. Má vysoký redukčný potenciál a nízku hmotnosť, kvôli čomu majú tieto batérie vysokú hustotu energie vzhľadom na hmotnosť (100-230 Wh/kg). Soli sodíka majú vysoký výskyt v prírode, sú lacné a netoxické. Síra je materiál kladnej elektródy, ktorá môže byť použitá v kombinácii so sodíkom. Síra podobne ako sodík v prírode veľmi dostupná a lacná. Problémom NaS článku je vhodný elektrolyt. Vodné elektrolyty na rozdiel od lítia nemožno použiť a nebol nájdený žiadny vhodný polymér. To je dôvod použitia keramického materiálu beta-oxidu hlinitého ( $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ako elektrolytu. Je to elektronický izolátor, ale nad 300 °C má vysokú iónovú vodivosť pre sodíkové ióny. Táto teplota sa dosahuje aj kvôli uchovaniu elektród v kvapalnom stave. Batéria sa vybíja pri 300 až 400 °C. Sodné ióny prechádzajú cez zápornú elektródu cez elektrolyt na kladnú elektródu. Tam reagujú so sírou a vznikajú kladné polysulfidy. Štandardné napätie na článku je 2 V [34]. Akumulátory NaS majú vysokú účinnosť (85-92 %). Sú najvhodnejšie pre stacionárne aplikácie úložísk na podporu elektrizačnej sústavy, kvôli svojej vysokej teplote a korozívnej povahe polysulfidu sodného [32]. Najväčšie úložisko (Buzen, Japan) využívajúce túto technológiu má kapacitu 50 MW/300 MWh [35].

## Sodík-nikel-chlorid (ZEBRA)

Sodík-nikel-chlorid batérie, iným menom ZEBRA batérie (Zero Emission Battery), sa svojou konštrukciou podobá na NaS. Pri nabíjaní sa NaCl a Ni premení na nikel-chlorid  $\text{NiCl}_2$  a roztavený sodík. Naopak pri vybíjaní. Požadovaná vnútorná teplota je od 270-350 °C. Hustota energie pri tejto technológii sa pohybuje okolo 115 Wh/kg [1].

### 1.2.3 Prietokové batérie (FBES)

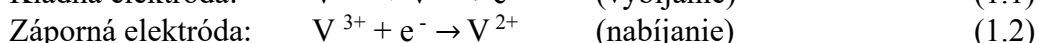
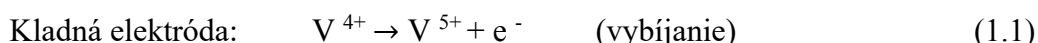
Prietokové batérie sa skladajú z dvoch kvapalných elektrolytických systémov obsahujúcich rozpustené chemické zlúčeniny, ktoré sú použité na akumuláciu energie. Ďalej zo záporného a kladného elektrolytu a elektródy. Elektrochemické reakcie cez iónomeničovou membránu do regeneračného napájacieho článku/reaktora sú vratné. Elektrolyt v oboch systémoch sa počas nabíjania čerpá do reaktora. Prechod k vybíjaniu je takmer okamžitý. Použitím veľkých nádrží a spojením veľkého množstva článkov môže byť uložené a následne uvoľnené veľké množstvo energie. Kvôli rozdeleniu elektrolytov je miera samovybíjania nízka. V porovnaní s klasickými batériami majú radu výhod: zvýšenie kapacity zväčšením množstva elektrolytu, úplne vybitie akumulátora

neznehodnocuje FBES a má malý úbytok elektrolytu počas cyklovania. Veľkosť reaktora určuje disponovaný výkon a veľkosť zásobníkov celkovú akumuláciu kapacitu [1].

Základom existujúcich návrhov FBES sú tri rôzne elektrolyty, podľa ktorých ich je možné rozdeliť na vanádium redoxné (VRB), zinkovo-brómové (ZRB), polysulfidovo brómové (PSB) a v posledných rokoch je snaha vyvinúť organické prietokové batérie.

### Vanádium redoxné (VRB)

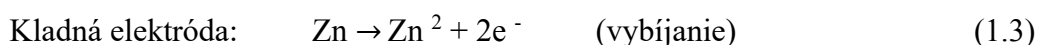
Batérie VRB využívajú schopnosť vanádu existovať v štyroch rôznych oxidačných stavoch. V každom napájacom článku VRB sú vanádové-redoxné páry uložené v miernej kyseline sírovej. Vanádové páry  $V^{2+}/V^{3+}$  sú v negatívnom a  $V^{4+}/V^{5+}$  v pozitívnom poločlánku. Počas nabíjacieho/vybíjacieho cyklu sú  $H^+$  ióny vymieňané medzi dvoma nádržami elektrolytov prostredníctvom polymérovej iónomeničovej membrány vytvárajúc napätie 1,4-1,6 V. Reakcie sú vyjadriteľné ako:



Pri týchto systémoch sa hovorí o 85 % účinnosti. Majú potenciál vo zvyšovaní kvality elektriny v sieti, počas energetických špičiek, zvyšovaním stability siete a uľahčujú integráciu obnoviteľných zdrojov. Zvyčajná inštalovaná kapacita sa pohybuje okolo 3 MW/6 MWh [32].

### Zinkovo-brómové (ZRB)

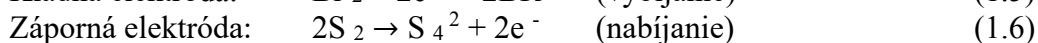
Pri batériách ZRB prúdia dva rôzne elektrolyty okolo kompozitných uhlíkovo-plastových elektródach v dvoch systémoch oddelených od seba prostredníctvom mikroporéznej polyolefinovej membrány. Počas vybíjania sa Zn a Br spojí do bromidu zinočnatého vytvárajúc napätie 1,8 V na každom článku. Počas nabíjania sa kovový zinok ukladá v podobe tenkého filmu na zápornú elektródu. Uvoľňovanie brómu na kladnú stranu systému vytvára reakcie s organickými amínmi a vytvára sa hustejší brómový olej. Pridaným okruhom sa počas vybíjania môže miešať so zvyškom elektrolytu. Reakcie sú vyjadriteľné nasledovne:

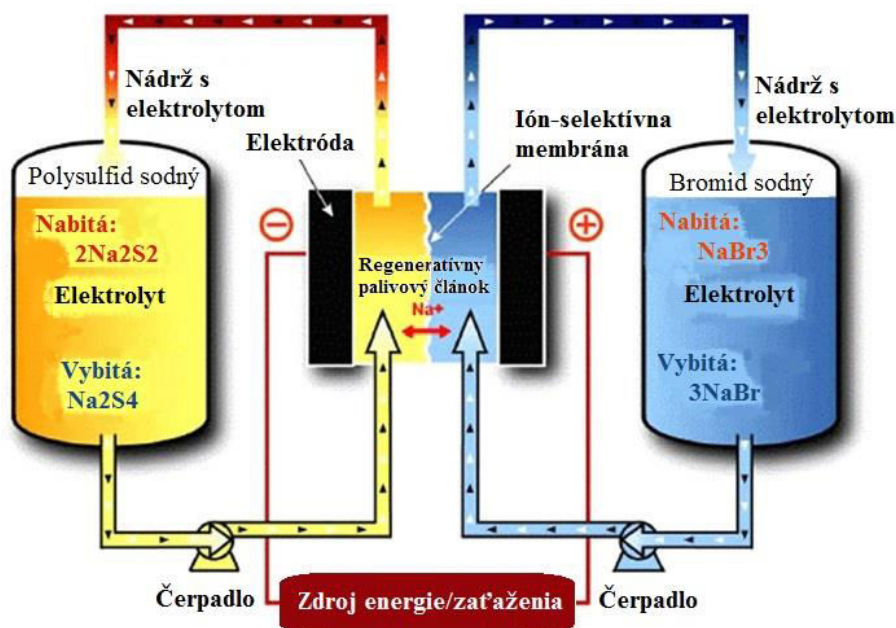


Kvôli dvom uvoľnením elektrónom počas reakcie dosahujú najvyššiu energetickú hustotu spomedzi FBES. Avšak prvky týchto systémov sú finančne náročnejšie a je potrebné vyriešiť aj bezpečnostné problémy v súvislosti s aminovou stabilitou brómu. Kvôli tomu je nutné aktívne chladenie systému. Celková účinnosť tohto systému sa pohybuje okolo 75 %. Typická kapacita pre tento typ FBES je približne 500 kW/6 MW [32].

### Polysulfidovo brómové (PSB)

Batérie PSB (obr. 8) je založená na technológii regeneračného palivového článku, ktorý zaisťuje vratnú elektrochemickú reakciu medzi dvoma roztokmi elektrolytických solí (bromid sodný a polysulfid sodný). Celková účinnosť je približne 75 %. Pre tieto zariadenia sú bežné inštalované výkony 15 MW/120 MWh. PSB elektrolyty v reaktore článku oddeľuje polymérová membrána, ktorá umožňuje prechod iba sodíkovým iónom, produkujúc okolo 1,5 V. V PSB systémoch je pozitívnym elektrolytom bromid sodný a záporným polysulfid sodný [32]. Reakcie sú nasledovné:





Obr. 8 Ilustrácia hlavných častí prietokových batérií (systém PSB) [1]

Medzi ďalšie výhody patrí vysoký výkon a energetická kapacita, rýchle nabíjanie výmenou vybitého elektrolytu, vysoká životnosť vďaka jednoduchej výmene elektrolytu, možnosť úplného vybitia, použitie netoxických materiálov a prevádzka za nízkych teplôt. Hlavnou nevýhodou je potreba pohyblivých mechanických častí ako sú čerpace systémy. Následkom je problematická miniaturizácia celého systému, kvôli ktorej je obmedzený komerčný potenciál FBES. Kvôli vysokej kapacite sú FBES vhodné na dlhodobé zálohovanie [1]. Dostavba doteraz najvýkonnejšieho úložiska FBES využívajúce VRB by mala byť ukončená na začiatku roka 2020 s výkonom 20 MW/80 MWh v meste Dalian (Čína) [22]. Tieto systémy dosahujú účinnosť 75 – 85 %. Napätie na článku je závislé na použiteľnom elektrolyte a pohybuje sa od 1,4 do 2 V [31].

#### 1.2.4 Zotrvačnickové úložiská (FES)

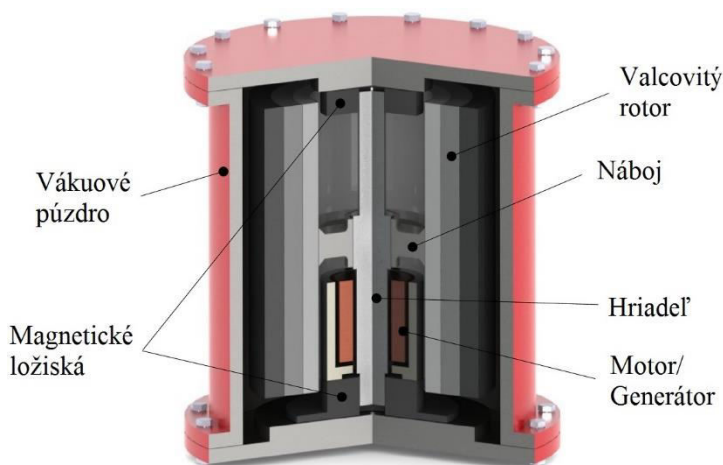
Zotrvačnickové úložiská (obr. 9) sa skladajú zo zotrvačníka (rotor), ktorý je roztáčaný s motorgenerátorom a dosahuje vysoké otáčky, tým uchováva energiu vo forme kinetickej energie, ktorá je neskôr pri brzdení premieňaná späť na elektrickú energiu. Pre kinetickú energiu  $E_k$  akumulovanú zotrvačnikom platí vzťah

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2, \quad (1.7)$$

kde  $I$  je moment zotrvačnosti rotora vzhľadom k danej ose otáčania a  $\omega$  je veľkosť uhľovej rýchlosti zotrvačníka.

Používajú sa dva typy zotrvačnickových akumulátorov. Jeden typ využíva zotrvačníky veľkej hmotnosti usporiadané tak, aby bol dosiahnutý čo najväčší moment zotrvačnosti. Pracuje pri otáčkach približne do 8000 min<sup>-1</sup>. Druhý typ používa ľahké zotrvačníky, pracujú pri otáčkach až okolo 100 000 min<sup>-1</sup>. Sú najvhodnejšie pre aplikácie s vysokými výkonmi, malým množstvom energie a vyžadujúcich mnoho cyklov. Možnosť použitia takto vysokých otáčok je dosiahnuteľná prostredníctvom kompozitných materiálov. Pri takto vysokých otáčkach musí byť rotor uložený vo vákuu aby sa predišlo treniu so vzduchom. Časté je uloženie prostredníctvom magnetických ložísk s magnetickou levitáciou, poprípade vzduchových ložísk. Prostredníctvom vákua a použitím špeciálneho uloženia je snaha znížiť samovybíjanie, a tým zvýšiť účinnosť systému, čo má za následok zvyšovanie nákladov. FES majú schopnosť úplného vybitia

do niekoľkých sekúnd. Počet úplných nabíjacích cyklov je v rozmedzí desiatok až 200-tisíc v závislosti od únavovej životnosti. Ich početnosť neznižuje kapacitu FES [1], [16].



Obr. 9 Hlavné časti bežného zotrvačníka [21]

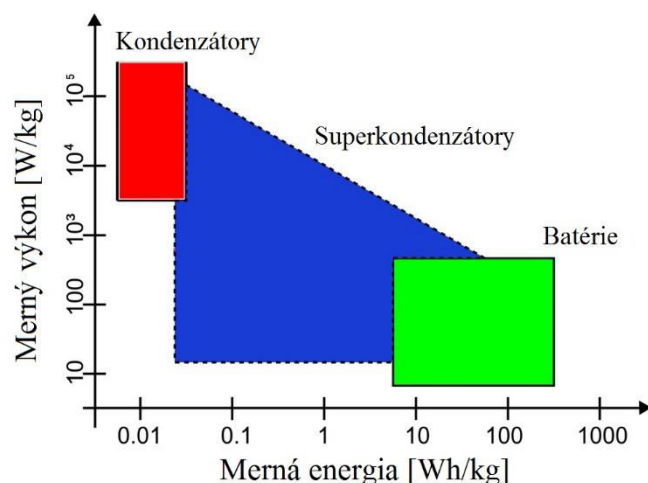
Na skladovanie energie v elektrizačnej sústave sú potrebné veľkokapacitné zotrvačníky. Trecie straty na 200 t zotrvačník sa odhadujú na cca 200 kW. Za použitia tohto predpokladu je okamžitá účinnosť 85 %, celková účinnosť po 5 h by sa znížila na 78 % a za jeden deň by účinnosť klesla na 45 %. Z tohto dôvodu sa dlhodobé skladovanie energie prostredníctvom FES nepredpokladá. Akumulátory kinetickej energie môžu byť tiež použité k distribúcii elektrickej energie, v podobe veľkokapacitných záložných zdrojov, v mestských oblastiach porovnateľne s vodnými nádržami, ktorých cieľom je maximalizovanie účinnosti výrobných jednotiek. Príkladom sú veľké inštalácie skladajúce sa zo štyridsiatich 25 kW systémov, schopné uchovať 1 MW energie a uvoľniť ju v priebehu jednej hodiny [1]. Systémy FES sa obzvlášť hodia k zvyšovaniu kvality elektrickej energie a spoľahlivosti siete. Ďalej sú vhodné pre použitie u časti systémov pri hybridných vozidlách pri zastavení a pohnutí sa alebo pri regeneratívnom brzdení.

Najvýkonnejšie zariadenie tohto druhu (Aningdon, Veľká Británia) bolo sprevádzkované v roku 2006 a slúži na podporu energetických nárokov výskumu jadrovej fúzie. Krátkodobý výkon dvoch zotrvačníkov predstavuje 400 MW [22].

### 1.2.5 Superkondenzátory (SES)

Pomocou kondenzátorov sa realizuje skladovanie energie priamo, vo forme elektrického poľa. Superkondenzátory v porovnaní energetických vlastností (merný výkon/merná energia) sa nachádzajú medzi (obr. 10) bežnými kondenzátormi a batériami.





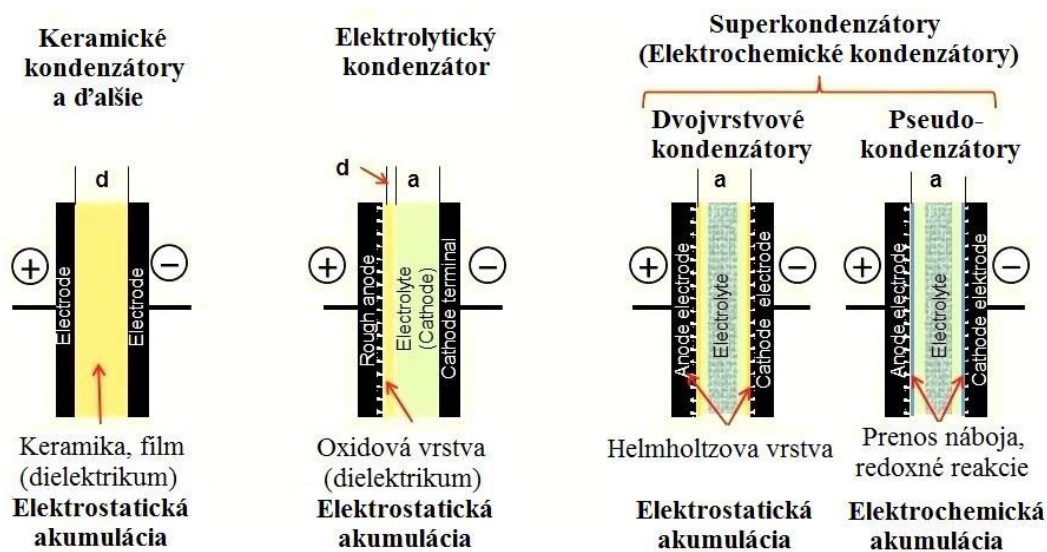
Obr. 10 Energetická bilancia superkondenzátorov [28]

V porovnaní s elektrochemickými batériami majú SES hustotu energie na jednotku objemu malú, avšak kvôli minimálnemu vnútornému odporu sú schopné rýchleho nabitia. Elektrická energia  $E_{el}$  uchovaná v SES je

$$E_{el} = \frac{1}{2} C U^2, \quad (1.8)$$

kde  $C$  je kapacita kondenzátora a  $U$  napätie medzi elektródami [16].

Podľa princípu nabíjania (obr. 11) sa delia na EDLC (elektrochemické dvojvrstvové kondenzátory) a pseudokondenzátory.



Obr. 11 Schematické zobrazenie keramických a elektrolytických kondenzátorov, a superkondenzátorov [30]

Pri EDLC nedochádza k žiadnym chemickým reakciám a prenosu náboja medzi elektródami a elektrolytom. Využívajú princíp elektrochemickej dvojvrstvy, tá sa skladá z dvoch opačne nabitých vrstiev. K nabitému povrchu sú priťahované ióny elektrostatickými silami. Pri nabíjaní vytvárajú ióny elektrolytu na oboch elektródach polarizovanú dvojvrstvu z aniónov, resp. kationov. Energia sa ukladá do podoby elektrického náboja, je elektrostaticky viazaný na elektróde. Kvôli princípu činnosti je zaručená dlhá cyklická životnosť. Väčšiu kapacitu v porovnaní s klasickými kondenzátormi dosahujú kvôli špeciálnemu porézному materiálu elektród (expandovaný grafit až okolo 3000 m<sup>2</sup>/g).

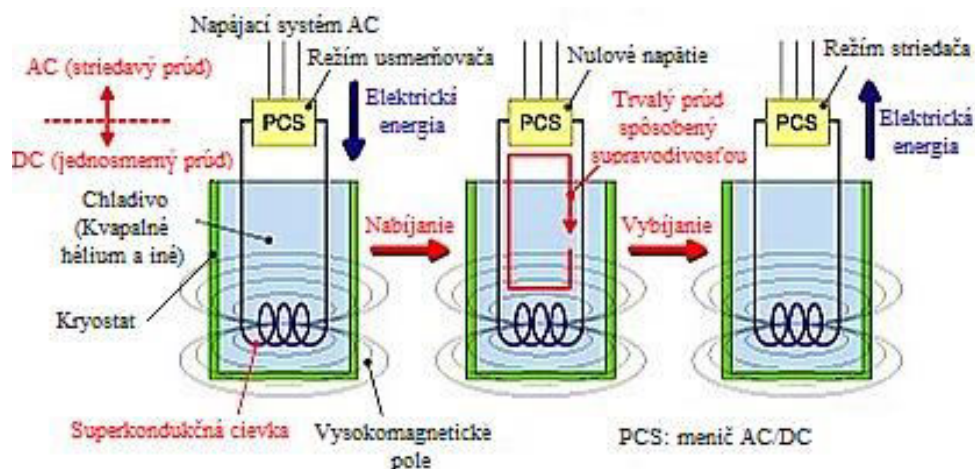
Pseudokondenzátory využívajú redoxné reakcie na povrchoch elektród, principiálne podobné batériám. Jedna elektróda je z uhlíkových sadzí alebo expandovaného grafitu, druhá sa najčastejšie skladá z oxidu kovu s tunelovou štruktúrou. Vratného prijímania a výdaju napríklad iónov vodíka alebo lítia nie sú tieto oxidy schopné. Materiál elektródy prostredníctvom chemickej väzby uchováva energiu. Kapacita pseudokondenzátora je daná elektrochemickou kapacitou elektródy. Nevýhodou je rýchlejšie starnutie počas nabíjajúcich cyklov vďaka rozmerovým zmenám elektród. V porovnaní s EDLC majú veľmi vysokú kapacitu, avšak majú nižšiu účinnosť nabíjania a dlhšiu časovú odozvu [29].

SES môžu mať napätie medzi 2,5 až 3 V. Napätie do 3,8 V sa dosahuje hybridnými kondenzátormi. Vyššie napätie sa dosahuje sériovým zapojením. V súčasnej dobe sú na trhu SES s kapacitou medzi 2 až 7500 F [1], [30].

Na rozdiel od batérií, ktoré vykazujú vysokú hustotu energie (100-200 Wh/kg) sú SES založené na rýchlych podpovrchových a vratných mechanizmoch. Z tohto dôvodu vykazujú nižšiu hustotu energie (5-10 Wh/kg) ako batérie, ale oveľa väčšiu výkonovú hustotu na kilogram a životnosť (až milióny cyklov). Ďalšou výhodou je až 95 % účinnosť akumulácie energie. Medzi nevýhody patrí závislosť napätia na uloženom náboji, ktorú je možné minimalizovať prostredníctvom napäťových meničov. Vhodnou oblasťou pre použitie SES sa javí fotovoltaika, kde môžu kompenzovať krátkodobé výkyvy menších systémov spojených so sieťou [27]. Od roku 2015 jazdia v Číne autobusy verejnej dopravy využívajúce SES, ktoré sú schopné plného nabitia počas 10 s (prebieha na každej zastávke), s výdržou batérie približne 5 km [30]. Hlavným cieľom výskumu v tejto oblasti je dosiahnuť vyššiu objemovú hustotu energie pri výhodách, ktoré SES ponúkajú [27].

### 1.2.6 Supravodivé magnetické akumulátory (SMES)

Pri technológii SMES (obr. 12) reprezentuje magnetické pole uloženú energiu. Keď je magnet nabíjaný vďaka supravodivej cievke, tepelné straty v cievke môžu byť prakticky nulové a systém predstavuje elektromagnetické úložisko energie. Supravodivosť je udržateľná, ak sú splnené podmienky: teplota, prúdová hustota a magnetická indukcia cievky. Nabíjanie sa uskutočňuje prevedením striedavého prúdu z elektrickej siete na jednosmerný prúd, ktorý preteká cievkou. Pri vybíjaní sa jednosmerný prúd prevádza na striedavý a distribuuje do siete.



Obr. 12 Princíp fungovania SMES [24]

Energia je akumulovaná bez prevedenia na inú formu. Cievka je konštruovaná pre veľké prúdy zo supravodivého materiálu (t.j. s nulovým odporom vodiča) a je kryogénne chladená (napríklad kvapalným héliom). Chladenie supravodivého vinutia sa vykonáva



pomocou tekutého hélia pri teplote 4,2 K alebo tekutého dusíka pri 77 K, ktorý je inštalovaný vo vnútri adiabatického kontajnera (kryostat) [24]. Inak by sa elektrická energia na odpore cievky transformovala na teplo. Cievka musí byť dostatočne zaizolovaná [16]. Energiu akumulovanú do cievky  $E_{mg}$  sa dá vyjadriť vzťahom

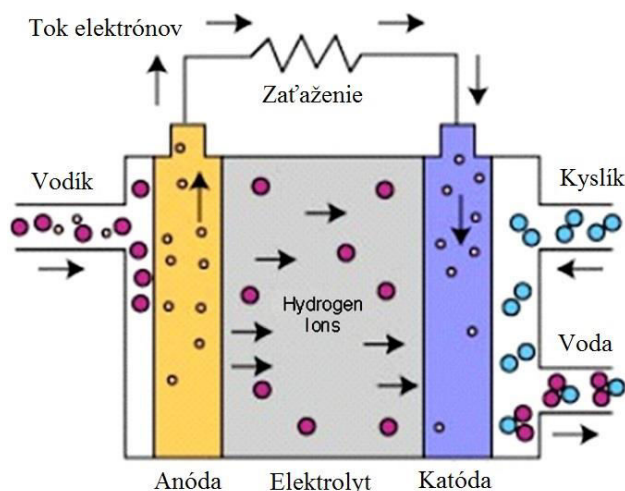
$$E_{mg} = \frac{1}{2}LI^2, \quad (1.9)$$

kde  $L$  je indukčnosť cievky a  $I$  prúd pretekajúci cievkou.

Vzhľadom na ich konštrukciu sú ich prevádzkové náklady vysoké a preto sú vhodné na hlboké vybíjanie a nepretržitú prevádzku. Rýchla odozva (do 0,2 ms) týchto systémov je ideálna pre reguláciu stability siete, k vyrovnaniu záťaže. Elektrická energia z SMES je teda k dispozícii takmer okamžite, a to krátkodobo aj pri veľmi vysokých výkonoch. V súčasnosti sa tieto zariadenia používajú do výkonu 3 MW na jednotku, k zabezpečeniu stability rozvodných sietí v distribučnom systéme a kvalitu elektrickej energie pre výrobné zariadenia vyžadujúce vysokokvalitnú elektrinu, napríklad pri výrobe čipov a polovodičov [1], [25]. Prvé malé supravodivé akumulátory UPS z USA pracujú so stratou 0,3 kWh za 24 h. Pri veľkých cievkach, ktoré by boli schopné akumulovať veľké množstvo energie nastáva problém s veľkosťou indukovaných výsledných síl. Systémy SMES sú preukázane schopné pracovať aj po viac miliónových nabíjaciach cykloch [26].

### 1.2.7 Palivové články - vodíkové úložiská (HES)

Palivové články môžu slúžiť na výrobu vodíka, pomocou elektrolýzy vody. Vodíkové úložiská využívajú dva rozdielne systémy, k nabíjaniu a k vybíjaniu úložiska. Výroba vodíka zahŕňa elektrolyzáčnú jednotku, ktorá separuje vodu na vodík a kyslík. Zvyčajne sa stlačený plyný vodík skladuje vo vysokotlakových nádržiach. Palivový článok je použitý na výrobu elektrickej energie. Existuje mnoho typov, základné rozdiely sú v použitom elektrolyte, prevádzkovej teplote, špecifických požiadavkách pohonných hmôt a aplikácií. Palivové články využívajú vodík a kyslík (obr. 13) zo vzduchu k výrobe elektriny počas energetických špičiek. Vedľajšími produktami sú teplo a voda. Palivo pri procese nehorí, čím sa docíli tichá výroba elektriny, čistý proces bez exhalátov a 2-3 krát väčšia účinnosť. Palivový článok sa skladá z dvoch katalyticky povlakovaných elektród (poréznu anódou a katódou) a elektrolytu, ktorý je medzi nimi podobne ako pri batériách. Druh elektrolytu a konštrukcie určuje typ a výkon palivového článku [1], [32].



Obr. 13 Ilustračný palivový článok a proces fungovania [13]

HES môžu nájsť uplatnenie v dlhodobom skladovaní, pretože ich samovybíjanie je zanedbateľné. Pre akumuláciu elektrickej energie pomocou kombinácie elektrolyzáčnej

jednotky a palivového článku je celková účinnosť okolo 35-45 %. Približne 70 % u elektrolyzačného procesu a 50 % pri palivovom článku [1].

Najvýkonnejší HES systém (Mainz, Nemecko) bol odovzdaný do prevádzky v roku 2015, má výkon 4 MW. Vyrobený vodík sa tu tlakuje pomocou iónového kompresora, skladuje sa v nádržiach, plní do prívosov a púšťa do plynovej siete (jeho koncentrácia v sieti sa reguluje a je limitovaná) [22]. Tieto systémy zvyčajne využívajú elektrinu mimo energetických špičiek. Vodík je často označovaný ako palivo budúcnosti, kvôli svojej vysokej energetickej hustote a nulovým emisiám. Prvé sériové hybridné auto na vodíkové palivo bolo vyrobené v roku 2008 [32].

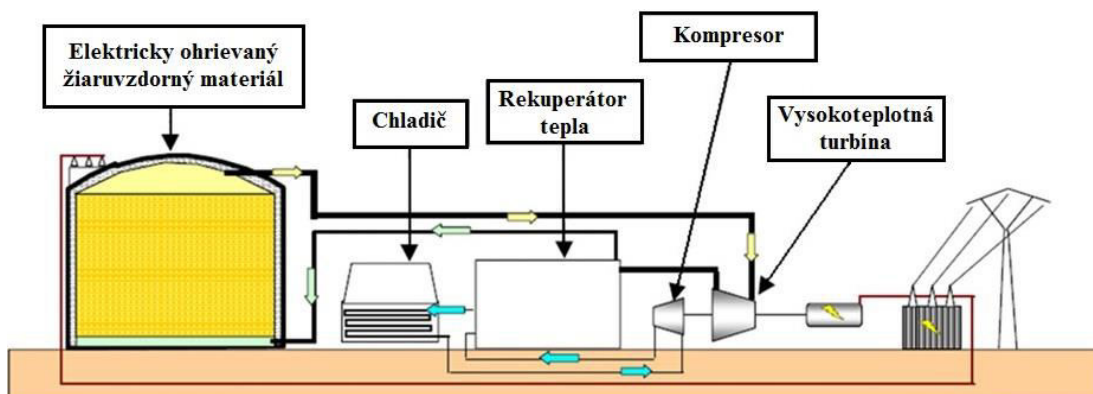
### 1.2.8 Tepelné úložiská (TES)

Tepelné úložiská sa delia v závislosti od používania latentného alebo citelného tepla.

TES na báze latentného tepla využívajú zmenu skupenstva pri konštantnej teplote z kvapalnej fázy na pevnú a opačne. V priebehu akumulácie sa prenosové médium mení z pevného stavu na kvapalinu a pri vybíjaní sa mení späť na pevnú látku. Prenos tepla medzi tepelným akumulátorom a externým prostredím sa robí prostredníctvom teplotnosnej kvapaliny. Energia je ukladaná pri danej teplote, o čo viac tepla o to väčšej koncentrácie. Na tento účel sa kvôli svojim dobrým akumuláčnym vlastnostiam využíva chlorid sodný, a to aj napriek svojej vysokej korozivite. Má vysokú teplotu topenia, priaznivý súčiniteľ prestupu tepla, stabilitu pri vysokej teplote a veľmi nízky tlak pary. Použitie hydroxidu sodného v TES na báze latentného tepla v elektrických kotloch by mohlo znížiť spotrebu elektrickej energie v priemyselných procesoch, kde potreba pary nie je kontinuálna a vyžaduje sa jej rozdielna intenzita [1], [13].

Pri TES na báze citelného tepla sa pracuje s médiom (sodík, roztavená soľ, tlaková voda a iné), ktoré počas akumulácie nemení fázu. Teplo sa použije na výrobu vodnej pary k pohonu turbíny/generátora. Najväčšie TES (Solana, USA) použité na akumuláciu tepla zo solárnej elektrárne má výkon 280 MW po dobu 6 h a pracuje s roztavenou soľou [22].

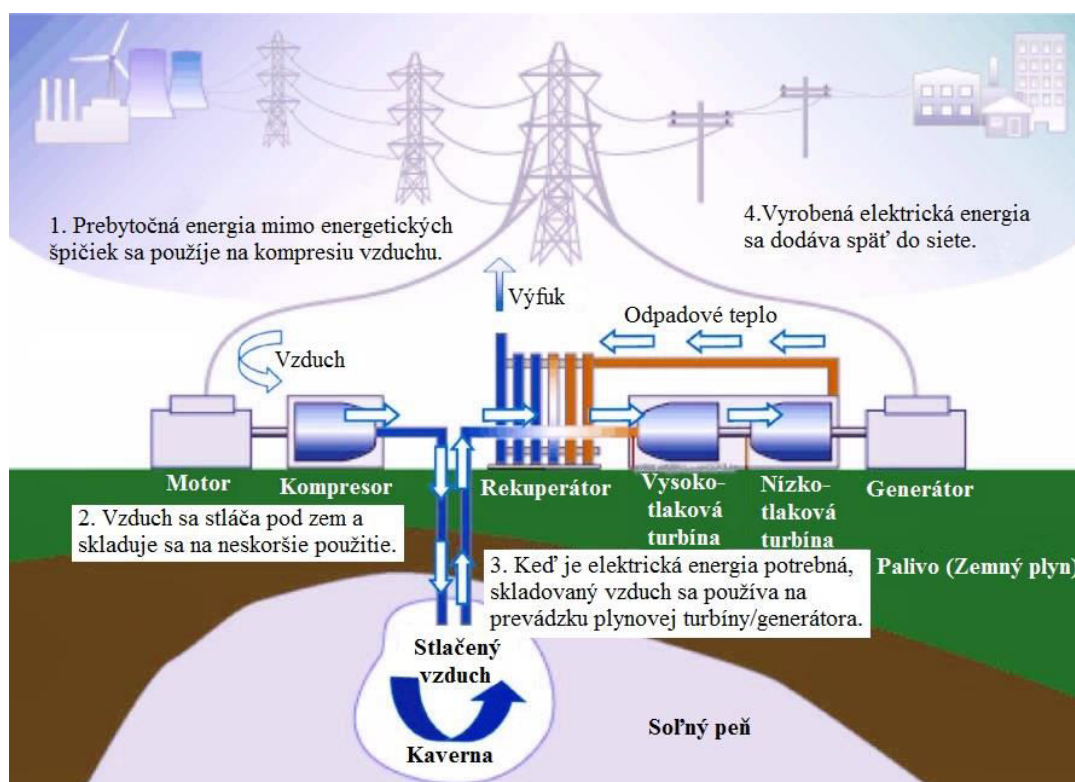
Novou technológiou sú vysokoteplotné TES s turbínou (obr. 14). Nabíjanie spočíva v zahrievaní žiaruvzdorného materiálu na približne 1400 °C pomocou elektrického odporu (vysoká účinnosť). Energia sa spätne získava ohrevom vzduchu, prostredníctvom žiaruvzdorného materiálu, ktorý je vedený na turbínu s kombinovaným cyklom. V systéme je možné uložiť veľké množstvo energie pri pomerne malých stratách, najmä pri veľkých systémoch. Akumulačný rezervoár určený pre 1 MWh by teoreticky mal mať priemer a výšku 20 m. Odhadovaná účinnosť je okolo 60 % [13].



Obr. 14 Vysokoteplotné tepelné úložisko s turbínou [13]

### 1.2.9 Akumulačné systémy na stlačený vzduch (CAES)

Systémy CAES sa využívajú na miestach, kde z geologických dôvodov nie je možné použiť akumuláciu pomocou PHS. Podobne patrí medzi veľkokapacitné akumulčné zdroje. Metóda systému CAES (obr. 15) je založená na použití lacnej elektrickej energie mimo špičku za účelom stlačenia vzduchu do objemného a vzduchotesného zásobníka (soľné jaskyne, opustené bane tvrdých hornín, prírodné kaverny alebo umelé zásobníky) pomocou kompresora. Počas denných hodín energetickej špičky sa stlačený vzduch použije k pohonu plynovej turbíny, ktorá je spojená s generátorom. CAES je druhá komerčná dostupná technológia (po PHS) schopná výkonu nad 100 MW prostredníctvom jedného zariadenia [23]. Počas prevádzky pri kompresii vzduchu sa kompresor zahrieva, naopak pri expanzii v turbíne sa vzduch ochladzuje [16]. Pomocou rekuperačných zariadení je snaha minimalizovať stratové teplo, a tým dosiahnuť vysokú účinnosť.



Obr. 15 Schéma hlavných častí a princípu fungovania CAES [7]

Výhodnosť systému CAES môže byť predovšetkým pre elektrárne so spaľovacími turbínami. Tie potrebujú prívod vzduchu, ktorý je bežne zabezpečený lopatkovým kompresorom na spoločnom hriadeli s turbínou. Kompresor v takomto usporiadaní spotrebuje takmer 2/3 výkonu turbíny [23].

V súčasnej dobe je v prevádzke osem systémov využívajúcich stlačený vzduch k výrobe elektrickej energie. Tri z nich majú inštalovaný výkon v rozmedzí 1-2 MW a dva s väčším inštalovaným výkonom disponujú 110 MW a 321 MW (McIntosh v Alabama a Kraftwerk Huntorf v Nemecku) [22]. Na rok 2020 je plánované komerčné prevádzkovanie zariadenia v Bethel, Texas s výkonom 317 MW [22], [43].

Akumuláciou pomocou stlačeného vzduchu sa podrobnejšie zaoberá kapitola č. 4.

## 2 TEORETICKÉ ZÁKLADY TERMODYNAMIKY PLYNOV

Na základe usporiadania molekúl, atómov a iónov v látkach rozlišujeme skupenstvá pevné, kvapalné, plynné a plazmu. Rozlišovacími kritériami stavu sú pohyblivosť a vzájomná vzdialenosť častíc. Plyny charakterizujú zvyčajne veľké vzdialenosti medzi molekulami, vyplňanie celého disponovaného priestoru, voľný pohyb častíc v danom priestore a ich malé vzájomné silové pôsobenie. Podľa zmien fyzikálnych vlastností prostredníctvom vonkajších vplyvov môžeme látky v plynnom skupenstve rozdeliť:

- Ideálne plyny – konštantné fyzikálne vlastnosti
- Nedokonalé plyny – fyzikálne vlastnosti mierne závislé na teplote
- Reálne plyny – teplota a tlak výrazne ovplyvňujú fyzikálne vlastnosti

Medzi fyzikálne vlastnosti látok v termodynamike patrí merná tepelná kapacita  $c$ , teplotná dĺžková rozťažnosť  $\alpha$ , teplotná objemová rozťažnosť  $\gamma$ , rozpínavosť  $\beta$  a ďalšie [36].

### 2.1 IDEÁLNY PLYN (VZDUCH)

Ideálne (dokonalé) plyny v praxi neexistujú a predstavujú dokonale elastické teoretické hmotné body, ktoré majú nulový objem. Sú v neustálom neusporiadanom pohybe a nepôsobia na seba príťažlivými a odpudzujúcimi silami. Riadia sa rovnicami a zákonmi odvodenými pre ideálne plyny [36]:

- a) Základné tvary stavovej rovnice ideálneho plynu

$$pv = rT ; pV = mrT ; pV_m = MrT = R_m T ; pV = n R_m T , \quad (2.1)$$

kde  $p$  je tlak plynu,  $v$  merný objem ( $v = V/m$ ),  $r$  merná plynová konštanta plynu,  $T$  teplota plynu,  $V$  objem a  $m$  príslušná hmotnosť plynu,  $n$  je látkové množstvo,  $M$  je mólová hmotnosť a  $R_m$  univerzálna plynová konštanta ( $R_m = Mr = 8314,47 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ),  $V_m$  je mólový objem ( $V_m = vM$ ). Pri vzduchu sa počíta s  $r = 287,04 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a  $M = 28,97 \text{ g.mol}^{-1}$ .

- b) Mayerov vzťah

$$c_p = c_v + r , \quad (2.2)$$

kde  $c_p$  je merná tepelná kapacita pri konštantnom tlaku,  $c_v$  je merná tepelná kapacita pri konštantnom objeme. Pre vzduch je  $c_p = 1005 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a  $c_v = 714 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

- c) Poissonova konštanta  $\kappa$  vyjadruje pomer  $c_p / c_v$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} , \quad (2.3)$$

ktorý je pri ideálnych plynch konštantný, keď aj  $c_p$  a  $c_v$  sú konštantné. Pri ideálnych plynch naberá Poissonova konštanta hodnoty v závislosti na počte atómov v molekule:  $\kappa = 1,67$  pri jednoatómových plynch,  $\kappa = 1,41$  pri dvojátómových plynch a  $\kappa = 1,3$  pri trojátómových plynch. Pri ideálnom vzduchu sa berie  $\kappa = 1,402$ .

- d) Zmena vnútornej energie  $du$  je rovná hodnotou prenášanému teplu  $q_v$  a je funkciou teploty

$$du = c_v dT = dq_v . \quad (2.4)$$

- e) Zmena entalpie  $dh$  je obdobne funkciou teploty [36]

$$dh = c_p dT . \quad (2.5)$$

Podľa výpočtového predpokladu nedochádza k strate energie a tým sa zjednodušuje výpočet. Uvedené fyzikálne vlastnosti suchého vzduchu sú pri teplote  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tlaku  $101\,325\text{ Pa}$  [38].

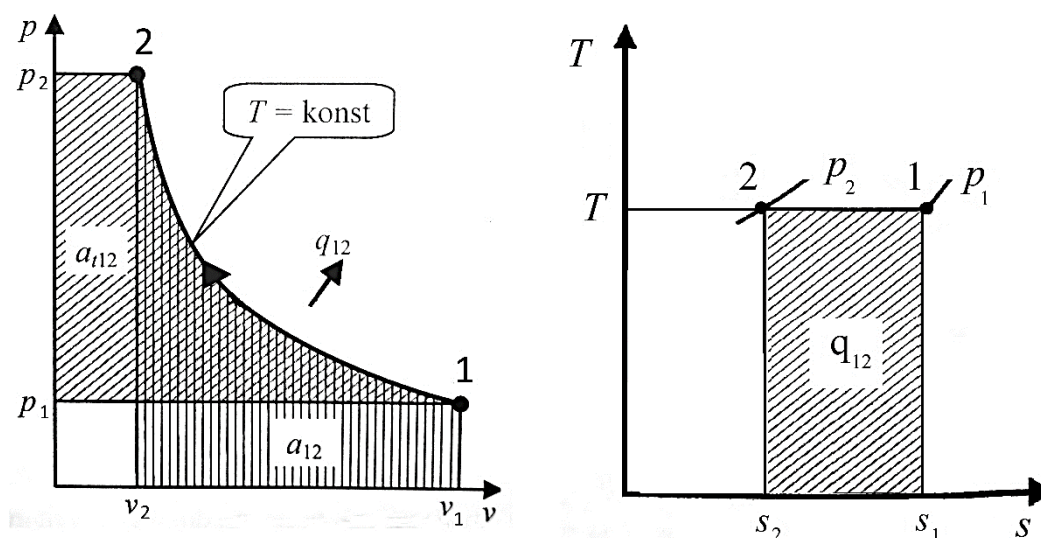
Medzi základné úlohy v termodynamike patrí riešenie termodynamických dejov. Termodynamické deje s ideálnymi plynmi sa rozlišujú na vratné a nevratné [36].

### 2.1.1 Vratné termodynamické deje

Vratné termodynamické deje nahrádzajú napr. pri tepelných strojoch skutočné procesy teoretickými dejmi, pri ktorých prechádza ideálny plyn rovnovážnymi stavmi. Po obrátení smeru vratného deja sa sústava môže vrátiť do pôvodného stavu (pri nevratných to nie je možné) [36]. Termodynamický proces prebiehajúci pri stláčaní plynov je kompresia, ktorú je teoreticky možné popísať izotermickým, adiabatickým a polytropickým dejom [37].

#### Izotermický dej

Izotermickým dejom môže byť izotermická kompresia a expanzia. Podmienkou je pomalý priebeh potrebný kvôli udržiavaniu konštantnej teploty prívodom alebo odvodom tepla. Dej (obr. 16) 1-2 prebieha po rovnoosej hyperbole, je izotermickou kompresiou, pri ktorej je prácu potrebné dodávať a teplo odvádzať [36].



Obr. 16 Izotermický dej (kompresia) v  $p$ - $v$  [36] a  $T$ - $s$  diagrame

Pre izotermický dej platia rovnice zmeny stavu

$$T = \text{konst}, dT = 0. \quad (2.6)$$

Po dosadení  $T_1 = T_2$  do stavových rovníc dostávame Boyle-Mariottov zákon

$$pv = \text{konst} \text{ alebo } p_1 v_1 = p_2 v_2. \quad (2.7)$$

Z prvej formy prvého zákona termodynamiky platí

$$dq = (c_v dT + p dv)_T = p dv = da, \quad (2.8)$$

podobne sa dá odvodiť z druhej formy

$$dq = (c_p dT - v dp)_T = -v dp = da_t. \quad (2.9)$$



Pri izotermickom deji vyplýva z (2.8) a (2.9) rovnosť tepla, objemovej práce a technickej práce, a to rovnako aj pri celkových jednotkách

$$q_{12} = a_{12} = a_{t12}, \quad Q_{12} = A_{12} = A_{t12}. \quad (2.10)$$

Pomocou integrácie (2.8) využitím stavovej rovnice dostávame výsledný vzťah pre mernú objemovú a následne aj celkovú prácu

$$a_{12} = rT \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad A_{12} = mrT \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 V_1 \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (2.11)$$

Obdobne z (2.9) dostávame vzťahy pre mernú a celkovú technickú prácu

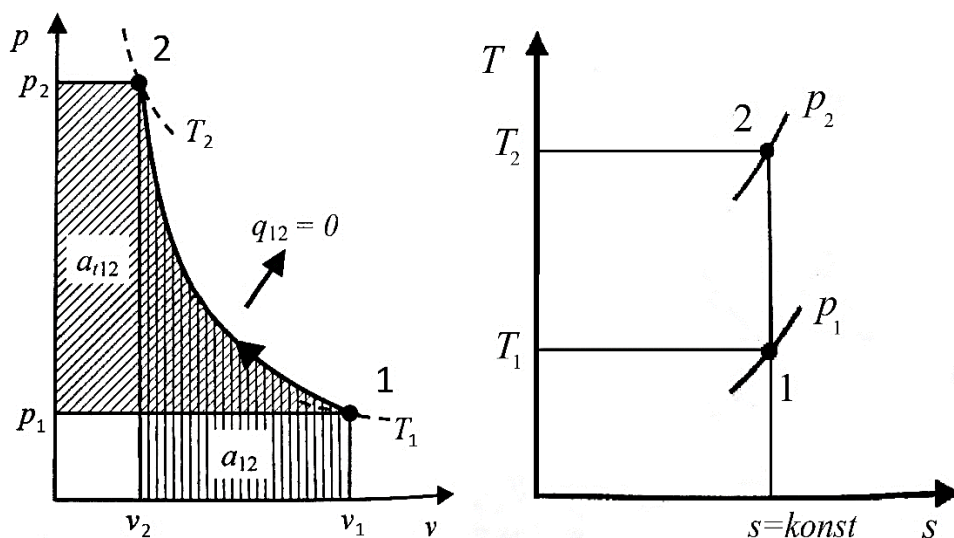
$$a_{t12} = rT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad A_{t12} = mrT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.12)$$

V T-s diagrame je izoterma rovnobežná s osou entropie a pre jej zmenu platí vzťah

$$s_2 - s_1 = r \ln \frac{v_2}{v_1} = r \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.13)$$

## Adiabatický dej

Adiabatická kompresia alebo expanzia nastáva, ak dej prebieha bez výmeny tepla s okolím, kvôli čomu je nezrealizovateľný, podobne ako izotermický dej. Avšak pri veľmi rýchlom priebehu deja a zanedbateľných tepelných stratách sústavy je adiabatický dej využívaný. Pri adiabatickej kompresii (obr. 17) 1-2 sústava spotrebúva prácu. Pri opačnom deji 2-1 sústava prácu vykonáva [36].



Obr. 17 Adiabatický dej (kompresia) v  $p$ - $v$  [36] a  $T$ - $s$  diagrame

Pri adiabatickom deji platí

$$dq = 0 \quad \text{a} \quad dQ = 0, \quad (2.14)$$

a je popísaný rovnicami adiabaty

$$p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa = konst, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}. \quad (2.15)$$

Pre mernú a celkovú objemovú prácu adiabatického deja platí

$$a_{12} = \frac{p_1 v_1}{\kappa-1} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right], \quad A_{12} = \frac{p_1 V_1}{\kappa-1} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]. \quad (2.16)$$

Medzi technickou a objemovou prácou platia vzťahy

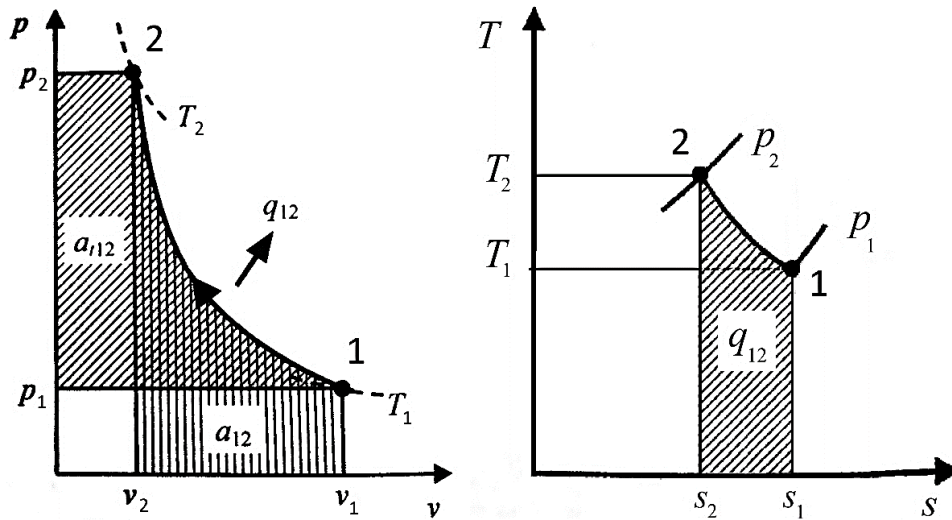
$$a_{t12} = \kappa a_{12} \text{ a } A_{t12} = \kappa A_{12} . \quad (2.17)$$

Technická merná a celková práca adiabatického deja je definovaná

$$a_{t12} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] , \quad A_{t12} = \frac{\kappa}{\kappa-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] . \quad (2.18)$$

### Polytropický dej

Polytropický dej nahrádza reálne deje presnejšie ako medzi polytropický a adiabatický dej, a v  $p$ - $v$  diagrame sa nachádza medzi nimi. Dej 1-2 predstavuje polytropickú kompresiu, sústava spotrebúva prácu a najčastejšie je pri nej teplo odvádzané. Pri expanzii 2-1 je to naopak. Pre polytropický exponent technickej polytropy platí  $n \in (1, \kappa)$  [36].



Obr. 18 Polytropický dej (kompresia) v  $p$ - $v$  [36] a  $T$ - $s$  diagrame

Pre polytropické rovnice zmeny stavu platí

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = konst , \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} . \quad (2.19)$$

Merná tepelná kapacita technickej polytropy je vždy záporná a platí pre ňu vzťah

$$c_n = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} . \quad (2.20)$$

Pre merné a celkové teplo platí

$$q_{12} = c_n (T_2 - T_1) \quad \text{a} \quad Q_{12} = m c_n (T_2 - T_1) . \quad (2.21)$$

Merná a celková objemová práca sa pri polytrope dá vyjadriť

$$a_{12} = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] , \quad A_{12} = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] . \quad (2.22)$$

Medzi technickou a objemovou prácou platí vzťah

$$a_{t12} = n a_{12} \text{ a } A_{t12} = n A_{12} . \quad (2.23)$$

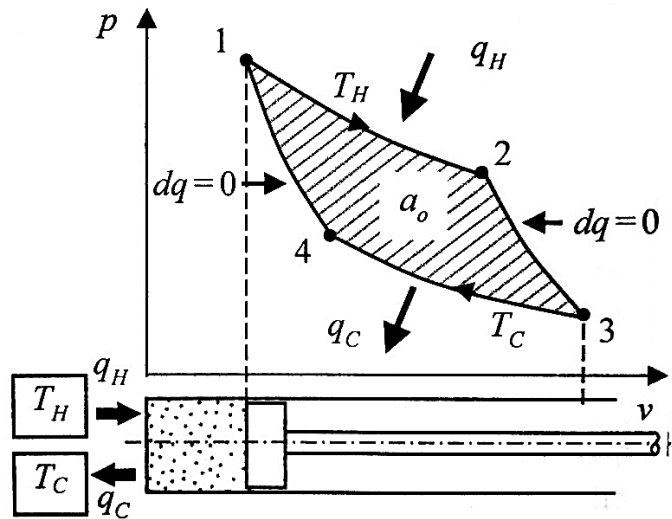
Pre mernú a celkovú technickú prácu polytropického deja platí

$$a_{t12} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad A_{t12} = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (2.24)$$

Polytropický dej bude využitý v kapitole č. 5.

### 2.1.2 Carnotov cyklus

Carnotov cyklus (obr. 19) pracuje s ideálnym plynom a je ideálnym teoretickým vratným termodynamickým cyklom, ktorému sa dá v praxi len priblížiť. Využíva sa k posudzovaniu účinnosti teoretických cyklov a skutočných tepelných motorov, pretože sa jedná o cyklus s najväčšou teoretickou účinnosťou. K svojej práci vyžaduje dva zdroje tepla rôznych konštantných teplôt ( $T_H$  a  $T_C$ ). Medzi zdrojmi a plynom dochádza k dokonalej výmene tepla. Nedochádza k žiadnym tepelným a mechanickým stratám [36].



Obr. 19 Priamy Carnotov cyklus v  $p$ - $v$  diagrame pre jeden kg plynu [36]

Pozostáva zo štyroch základných dejov: Dej 1-2 je pomalou izotermickou expanziou, privádza sa teplo  $q_H$  zo zdroja o teplote  $T_H$ . Dej 2-3 je rýchlou adiabatickou expanziou, nedochádza k výmene tepla. Pri 3-4 dochádza k pomalej izotermickej kompresii, odvádza sa teplo  $q_C$  do zdroja (zásobníka) o teplote  $T_C$ . Dej 4-1 je rýchlo adiabatickou kompresiou [38].

Privádzané teplo priameho Carnotovho cyklu pri 1-2 sa dá vyjadriť z izotermického deja, viz (2.10) a (2.11)

$$q_H = q_{12} = rT_H \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \text{alebo} \quad Q_H = Q_{12} = mrT_H \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (2.25)$$

Odvedené teplo pri 3-4 sa vyjadří obdobne

$$q_C = q_{34} = rT_C \ln \frac{v_4}{v_3} \quad \text{alebo} \quad Q_C = Q_{34} = mrT_C \ln \frac{v_4}{v_3}. \quad (2.26)$$

Pre prácu priameho Carnotovho cyklu platí

$$\begin{aligned} a_0 &= q_H - |q_C| = rT_H \ln \frac{v_2}{v_1} - rT_C \ln \frac{v_3}{v_4}, \\ A_0 &= Q_H - |Q_C| = mrT_H \ln \frac{v_2}{v_1} - mrT_C \ln \frac{v_3}{v_4}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

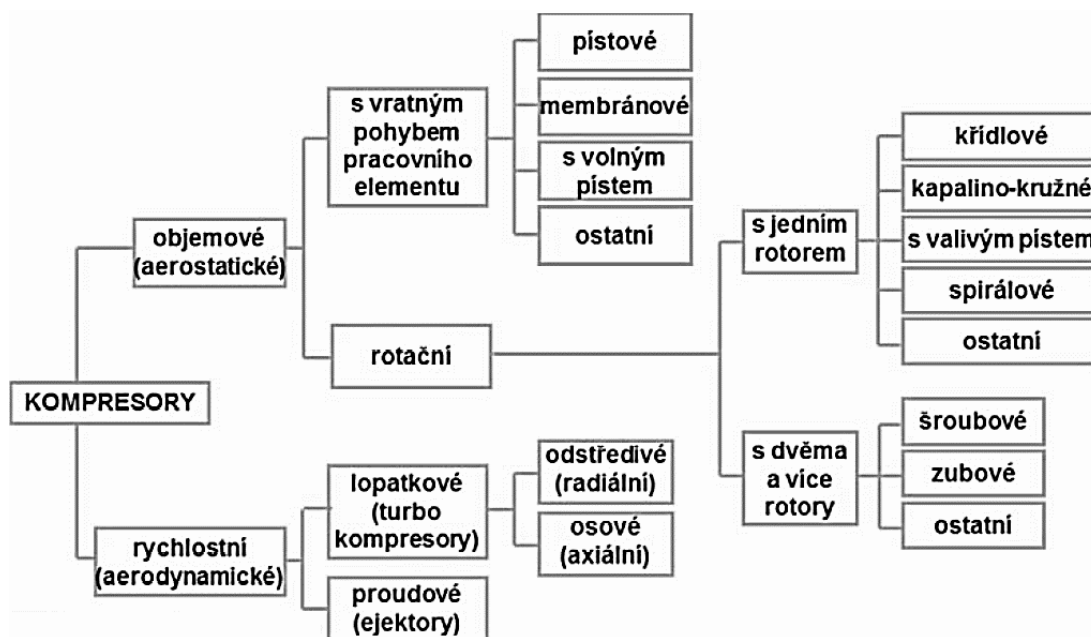


Po úpravách sa dá termická účinnosť Carnotovho cyklu vyjadriť

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_c|}{q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}. \quad (2.28)$$

## 2.2 KOMPRESORY

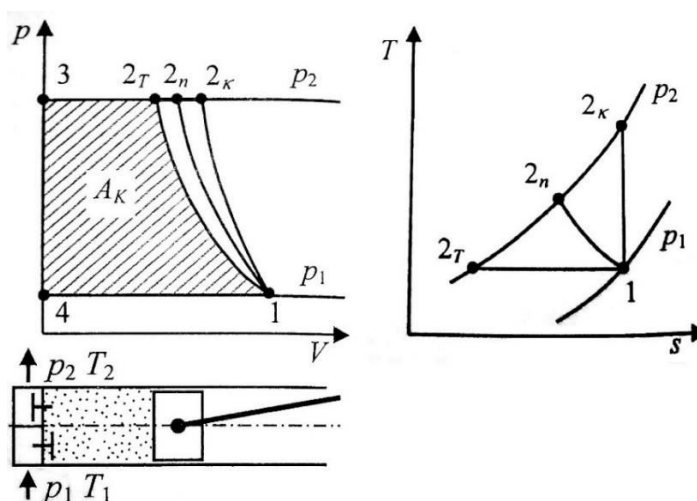
Kompresory slúžia ku kompresii plynov, pár a chladív, svojou činnosťou spotrebúvajú prácu. Zvyknú byť súčasťou cyklu tepelných strojov, ale nepatria medzi cykly [36]. Môžu byť rozdelené kategorizované nasledovne (obr. 20):



Obr. 20 Rozdelenie kompresorov podľa princípu kompresie [38]

### 2.2.1 Ideálne jednostupňové kompresory

Medzi jednostupňové ideálne kompresory patria piestové kompresory bez škodného priestoru a turbokompresory. U ideálnych kompresorov môže prebiehať kompresia (obr. 21) izotermicky, polytropicky alebo adiabaticky.



Obr. 21 Diagram  $p-v$  a  $T-s$  ideálneho jednostupňového kompresora [36]

Pri 4-1 nastáva nasávanie plynu (nie izobaricky). Dej 1-2 je jediným termodynamickým dejom a predstavuje kompresiu. Pri 2-3 je plyn vytlačávaný (nie izochoricky) [36].

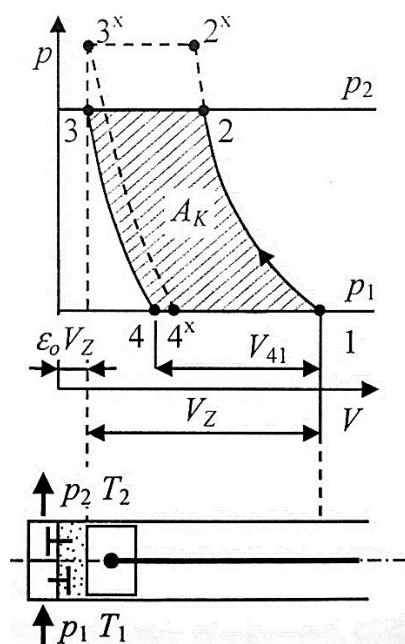
Pre prácu kompresora platí

$$A_K = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = A_{t12}, \quad (2.29)$$

a dá sa jednoducho vypočítať v závislosti od predpokladu (izotermického, adiabatického alebo polytropického deja) z rovníc (2.12), (2.18) alebo (2.24). Polytropický exponent  $n$  pri vzduchových kompresoroch, ktoré sú chladené vodou sa udáva  $n \in (1,2; 1,3)$  a pri nechladených  $n \in (1,45; 1,5)$  [38]. Z  $p$ - $v$  diagramu je zrejماً úspora práce pri chladiení kompresora.

## 2.2.2 Kompresory so škodlivým priestorom

Medzi kompresory so škodlivým priestorom patria piestové, ale aj iné objemové kompresory. U skutočných kompresorov nie je možné zostavenie bez vzniku škodlivého priestoru, z ktorého (dej 3-4) zvyšný plyn expanduje z tlaku  $p_2$  na tlak  $p_1$ . Na obrázku (obr. 22) je zdvihový objem  $V_Z = V_1 - V_3$  a veľkosť škodlivého priestoru  $V_3 = \varepsilon_0 V_Z$  je vyjadrená pomocou pomernej veľkosti škodlivého priestoru  $\varepsilon_0$ . Veľkosť nasávaného objemu  $V_{41} = V_1 - V_4$  je menšia od zdvihového objemu  $V_Z$  [36].



Obr. 22 Diagram  $p$ - $v$  jednostupňového kompresora so škodlivým priestorom a schéma zariadenia [36]

Pomerná veľkosť škodlivého priestoru je daná vzťahom

$$\varepsilon_0 = \frac{V_3}{V_Z}. \quad (2.30)$$

Objemová účinnosť kompresora je potom vyjadriteľná

$$\eta_0 = \frac{V_{41}}{V_Z} = \frac{V_Z(1+\varepsilon_0)-V_4}{V_Z} = 1 + \varepsilon_0 - \frac{V_4}{V_Z}. \quad (2.31)$$

Pre polytropickú kompresiu platí

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_4}{\varepsilon_0 V_Z} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} \Rightarrow \frac{V_4}{V_3} = \varepsilon_0 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (2.32)$$

a potom môžeme dosadiť do (2.31) vzťah  $V_4/V_Z$  a dostávame výsledný vzťah pre objemovú účinnosť

$$\eta_0 = 1 - \varepsilon_0 \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]. \quad (2.33)$$

Zo vzťahu vyplýva klesanie objemovej účinnosti s rastúcim tlakovým pomerom  $p_2/p_1$ . Rovnaký záver vyplýva aj z obr. 22, na ktorom je čiarkovane vidieť možnosť zvýšenia tlakového pomeru. Pre prácu kompresora so škodlivým priestorom, ktorý využíva polytropickú (2.22) expanziu aj kompresiu sa dajú napísať vzťahy

$$A_K = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] - \frac{n}{n-1} p_1 V_4 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (2.34)$$

$$A_K = \frac{n}{n-1} p_1 V_{41} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right].$$

Pre teoretický výkon kompresora pri polytropických dejoch platí [38]

$$P_K = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}_{41} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (2.35)$$

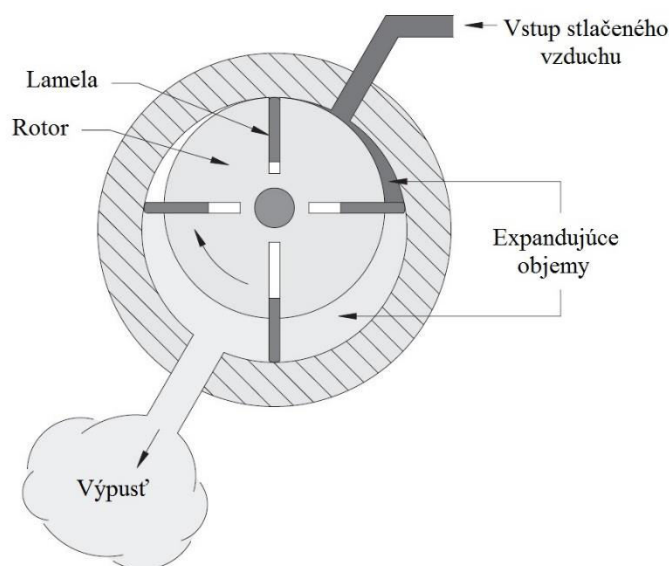
Teplotu po polytropickej kompresii dostaneme z (2.19)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (2.36)$$

## 2.3 PNEUMATICKÉ MOTORY

Pneumatické motory (pohony) prevádzajú energiu stlačeného plynu na mechanickú energiu. Rozdeľujú sa podľa pracovného pohybu [39]:

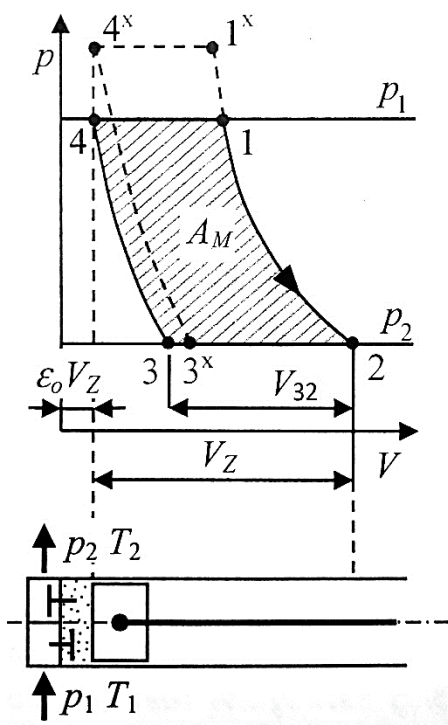
- priamočiary vratný (pneumatické valce, membrány)
- kývavý (vahadlový motor)
- rotačný (radiálne a axiálne piestové motory, zubové motory, lamelové motory (obr. 23) a turbíny)



Obr. 23 Princíp rotačného lamelového pneumatického motora [40]

### 2.3.1 Pneumatický valec s piestom

Pneumatické valce s piestom sa delia na jednočinné a dvojčinné. Pri jednočinných tlak vzduchu pôsobí len na jednu stranu piesta a pri dvojčinných striedavo na opačnú stranu piesta [39]. Pneumatické valce s piestom (obr. 24) vykonávajú podobný, ale obrátený cyklus v porovnaní s jednostupňovými kompresormi so škodlivým priestorom. Takže prácu nespotrebovávajú, ale vytvárajú. Dodávaním tepla do valca sa dá zvýšiť efektívnosť. Podobne ako u kompresorov nie je možná konštrukcia bez škodlivého priestoru a je možné vyjadriť podobné definičné vzťahy.

Obr. 24 Diagram  $p$ - $v$  jednostupňového valca s piestom so škodlivým priestorom a schéma zariadenia

Pri 4-1 sa vpúšťa stlačený plyn do motora (nie izobaricky). Dej 1-2 je jediným termodynamickým dejom a je polytropickou expanziou. Na obrázku je zdvihový objem  $V_Z = V_2 - V_4$  a veľkosť škodlivého priestoru  $V_4 = \varepsilon_0 V_Z$  je vyjadrená pomocou pomernej veľkosti škodlivého priestoru  $\varepsilon_0$ . Veľkosť objemu  $V_{41} = V_1 - V_4$  je menšia od zdvihového objemu  $V_Z$

Pomerná veľkosť škodlivého priestoru je daná vzťahom

$$\varepsilon_0 = \frac{V_4}{V_Z} . \quad (2.37)$$

Objemová účinnosť valca je potom vyjadriteľná

$$\eta_0 = \frac{V_{32}}{V_Z} = \frac{V_Z(1+\varepsilon_0)-V_3}{V_Z} = 1 + \varepsilon_0 - \frac{V_3}{V_Z} . \quad (2.38)$$

Pre polytropu platí

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_3}{\varepsilon_0 V_Z} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} \Rightarrow \frac{V_3}{V_Z} = \varepsilon_0 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} , \quad (2.39)$$

a potom môžeme dosadiť do (2.38) vzťah  $V_3/V_Z$  a dostávame výsledný vzťah pre objemovú účinnosť

$$\eta_0 = 1 - \varepsilon_0 \left[ \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] . \quad (2.40)$$

Objemová účinnosť, podobne ako pri kompresoroch, klesá s rastúcim tlakovým pomerom  $p_1/p_2$ . Pre prácu motora so škodlivým priestorom, ktorý využíva polytropickú (2.22) expanziu aj kompresiu platí vzťah [36]

$$A_M = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] - \frac{n}{n-1} p_1 V_4 \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] , \quad (2.41)$$

$$A_M = \frac{n}{n-1} p_1 V_{41} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] . \quad (2.42)$$

Pre teoretický výkon motora pri polytropickej kompresii a expanzii [38]

$$P_M = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V}_{41} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] . \quad (2.43)$$

Teplotu po polytropickej expanzii dostaneme z (2.19)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} . \quad (2.44)$$

### 3 PRAKTICKÉ APLIKÁCIE STLAČENÉHO VZDUCHU

Praktické aplikácie stlačeného vzduchu sa používajú naprieč celým priemyselným spektrom od jednoduchých aplikácií pri procese čistenia výpustnou pištoľou prostredníctvom tlakového vzduchu až po riadenie tlaku v petrochemických závodoch. Z hľadiska použitia môžu byť rozdelené na [41]:

- Energetické aplikácie - použitie vzduchu k vytvoreniu pohybu a sily
- Procesné aplikácie - vzduch pri nich vstupuje do procesu (skvapalňovanie, delenie zmesi vzduchu na zložky, chladenie, vetranie k biologickým procesom, dehydratácia a ďalšie)
- Ovládacie aplikácie - vzduch spúšťa, mení, zastavuje alebo inak spravuje procesy (široké využitie aj v energetických a procesných aplikáciách, ovládanie pneumatických strojov a ďalšie)

Pneumatické ovládacie prvky v porovnaní s elektrickými majú zvyčajne tretinovú veľkosť, sú nepriepustné pre vodu aj bez nákladnejších investícií a majú dlhšiu životnosť. V petrochemických závodoch nachádzajú uplatnenie pre nízke riziko iniciácie požiarov.

#### 3.1 ENERGETICKÉ APLIKÁCIE

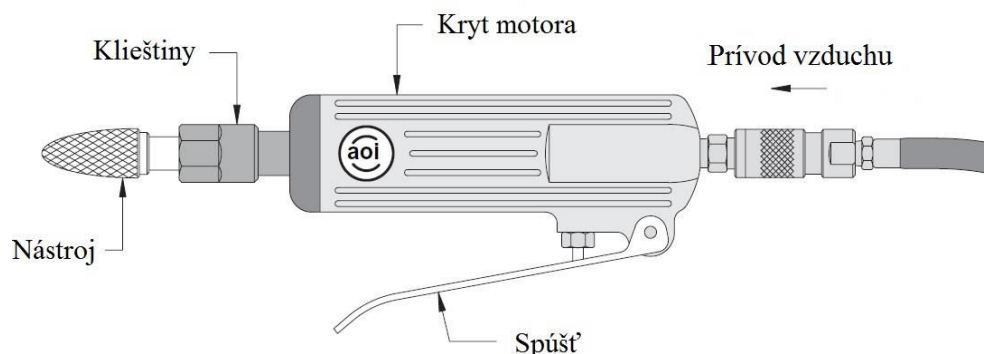
Medzi energetické aplikácie stlačeného vzduchu môžeme zaradiť pneumatické pohony (viz kap. 2.3), náradie a brzdy, upínacie zariadenia, vzduchové výťahy, pneumatické dopravníky a mnoho iných aplikácií [41].

##### 3.1.1 Pneumatické náradie

Pohon pneumatického náradia má tretinovú veľkosť pohonu elektrického náradia. Následkami sú nižšia celková hmotnosť a rozmery ručného náradia, a tým aj vyššia produktivita. Predstavujú bezpečnú a spoľahlivú alternatívu aj v nepriaznivom prostredí (prach a vlhkosť), bez nebezpečia úrazu elektrickým prúdom. Majú vysoký štartovací moment, odolnosť voči preťaženiu a nedochádza pri nich k prehrievaniu [42]. Môžu sem byť zaradené rotačné, perkusné (bicie), lakýrnické a iné náradie.

##### Rotačné náradie

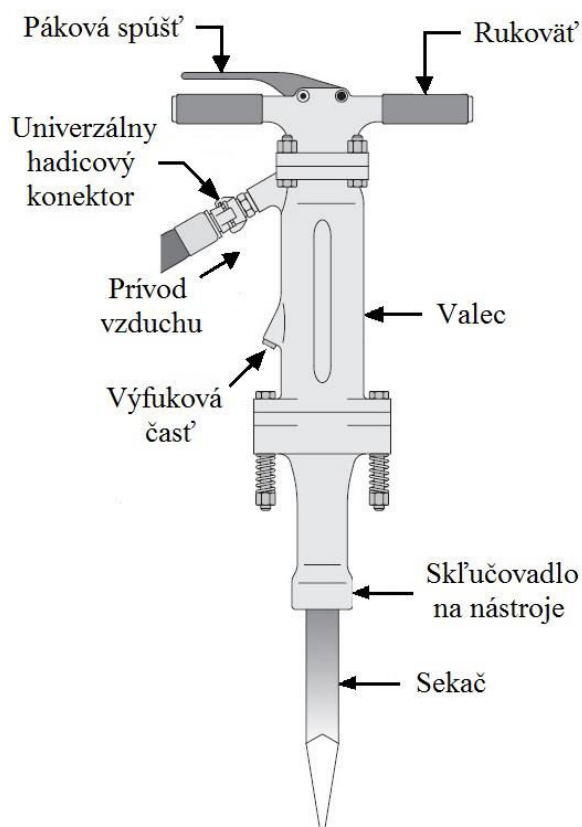
Medzi pneumatické rotačné náradie sa zaraďujú aj pneumatické vŕtačky, ťahovačky, skrutkovače a excentrické, uhlové brúsky a priame brúsky (obr. 25). Najčastejšie používanými pohonmi pri pneumatickom náradí sú rotačné pohony lamelové (otáčky do 60 000 min<sup>-1</sup>). Využívajú sa aj zubové motory a pre najvyššie otáčky, turbíny (do 120 000 min<sup>-1</sup>). K dosiahnutiu vyšších krútiacich momentov sa aplikuje prevod [42].



Obr. 25 Hlavné časti priamej pneumatickej brúsky [40]

## Perkusné náradie

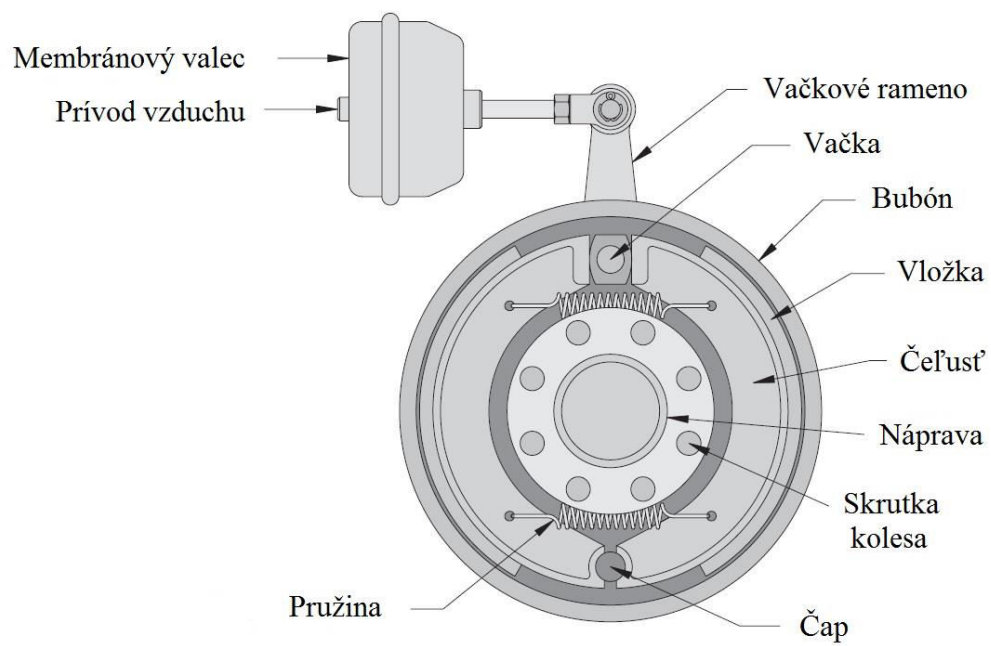
Perkusné (bicie) náradie využíva k pohonu pneumatické valce. Môžu sem byť zaradené búracie (obr. 26) a sekacie kladivá, vibrátory, nitovačky, dláta a pod. Najčastejšie sa používajú v stavebníctve. Náradie sa vyznačuje vysokým výkonom a použitie predpokladá fyzické predispozície [40].



Obr. 26 Hlavné časti búracieho kladiva [40]

### 3.1.2 Pneumatické brzdy

Pneumatické brzdy môžu byť súčasťou primárneho alebo záložného brzdového systému. Sú štáty, kde vozidlá nad určitú hmotnosť musia mať záložný brzdový systém a k tomu účelu sa najčastejšie využívajú pneumatické brzdy, ktoré sa automaticky použijú v prípade zlyhania riadiaceho brzdového systému. Na obr. 27 je typické usporiadanie vzduchovej brzdy. Na náprave sa nachádza bubon, ktorý je vybavený dvoma vnútornými čeľusťami. Spodná časť čeľustí je uložená na čape a horná sa opiera o vačku. Obe čeľuste sú držané v polohe prostredníctvom dvoch pružín. Vačka aj vačkové rameno sa nachádzajú na vačkovom hriadeľi. Na otáčanie vačky prostredníctvom vačkového hriadeľa a vačkového ramena sa použije membránový valec. Bez pneumatického tlaku vo valci sa vačka natočí a čeľuste sú tlačené na bubon brzdy. Po zvýšení tlaku sa čeľuste uvoľnia [40].

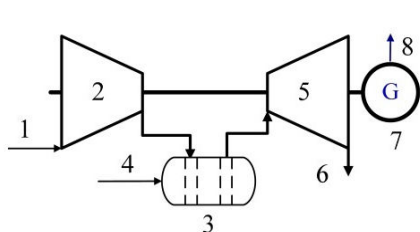


Obr. 27 Pneumatická brzda [40]



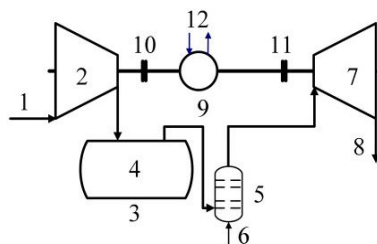
## 4 AKUMULAČNÉ SYSTÉMY NA STLAČENÝ VZDUCH (CAES)

CAES je komerčná technológia vhodná na dlhodobé skladovanie energie (desiatky hodín) so schopnosťou nábehu (studený štart) na plný výkon do 15 minút. Energia je regenerovaná prostredníctvom naakumulovaného stlačeného vzduchu (zvyčajne 4-8 MPa), spaľovaním menšieho množstva paliva (zvyčajne zemného plynu) a expanziou spaľovacích produktov cez turbínu [44]. CAES je lacnou technológiou k akumulácii veľkého množstva elektrickej energie. Veľkokapacitné zariadenia tohto typu môžu disponovať výkonom od stoviek do tisíce MW [46]. Základné informácie o CAES boli spomenuté v kap. 1.2.9. CAES oddeľujú kompresný a expanzný cyklus bežných spaľovacích turbín do dvoch, časovo oddelených procesov (obr. 28) [1].



1-Vzduch, 2-Kompresor, 3-Spaľovanie, 4-Palivo, 5-Turbína, 6-Výfuk, 7-Generátor, 8-Elektrická energia

a)



1-Vzduch, 2-Kompresor, 3-Zásobník, 4-Stlačený vzduch, 5-Spaľovanie, 6-Palivo, 7-Turbína, 8-Výfuk, 9-Motor/Generátor, 10 a 11-Spojka, 12-Elektrická energia

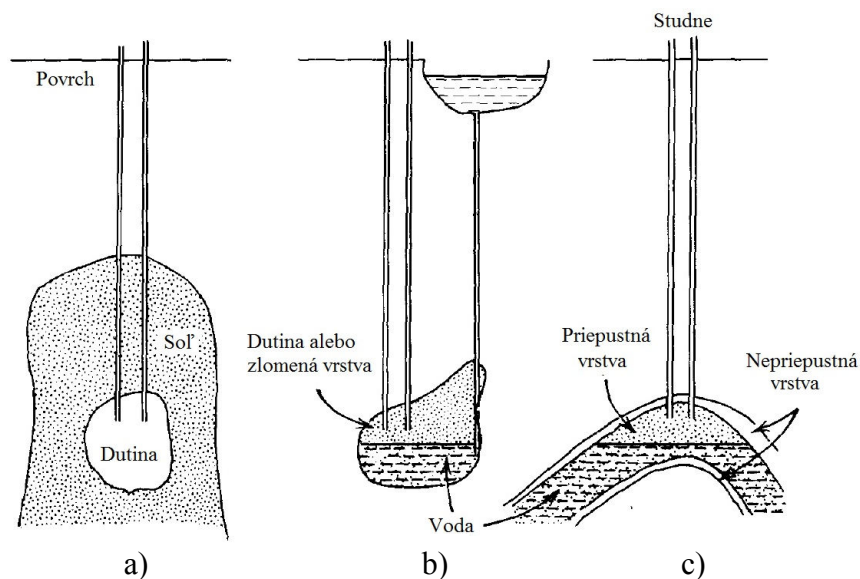
b)

Obr. 28 Schéma hlavných prvkov: a) spaľovacej turbíny a b) CAES [1]

Tlak vzduchu vo vnútri zásobníkov musí byť relatívne vysoký a to aj pri veľkom objeme, a jeho maximálna hodnota by mala byť výrazne vyššia ako je potrebná pre spaľovacu turbínu. Podobne aj minimálna veľkosť tlaku v zásobníku musí prevyšovať tlak potrebný pre turbínovú časť systému. Z dôvodu vysokého tlakového pomeru kompresora sú medzistupne kompresie opatrené chladením. Je snaha minimalizovať a udržiavať teplotu vzduchu (do cca 40-50 °C) stláčaného do zásobníkov regeneračnými zariadeniami, kvôli maximálnemu využitiu energie a ochrane cementových studní [44].

### 4.1 GEOLOGICKÉ PODMIENKY

Vhodné geologické podmienky pri veľkokapacitných aplikáciách sú nenahraditeľné. Ich identifikácia, z ktorej sa následne stanovujú investičné náklady predstavuje hlavnú prekážku pri rozsiahlych zavádzaní týchto zariadení [47]. Podzemné zásobníky môžu byť rozdelené do troch kategórií: soľné kupoly, dutiny v pevných skalách a vodopriepustné pórovité horniny (obr. 30).



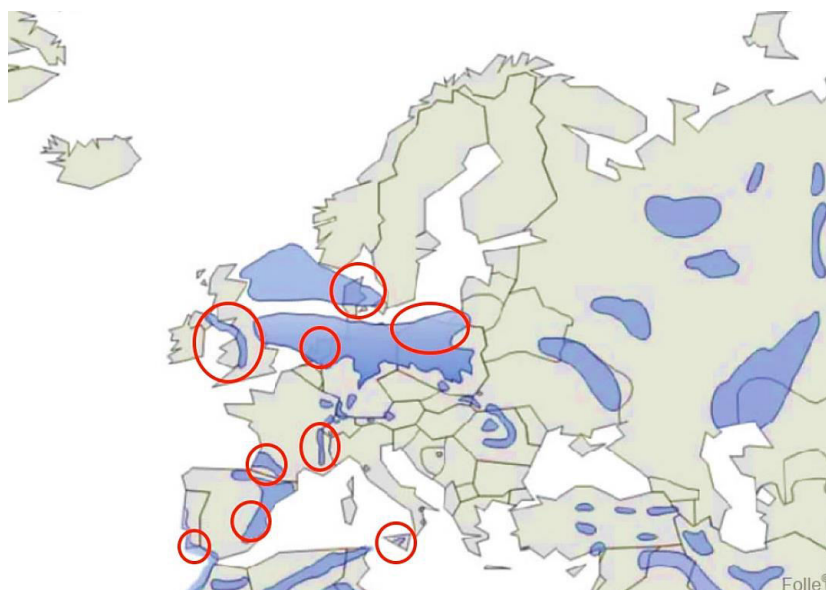
Obr. 10 Typy prírodných kavern: a) v soľnej dutine, b) v skale s kompenzačným povrchovým rezervoárom a c) v pórovitej hornine [25]

Dutiny v soľných usadeninách je možné vytvoriť vodným preplachovaním cez soľné ložisko. V prípade dlhotrvajúceho procesu (niekoľko rokov) sú náklady na vytvorenie veľmi nízke. Soľné kupoly sú soľné ložiská, ktoré sa vytlačajú smerom nahor k povrchu, čo umožňuje vytváranie dutín v rozumných hĺbkach.

Skalné dutiny môžu byť prírodné alebo vytvárané. Steny dutín sú dôkladne uzatvorené. Ťaženie za účelom vytvorenia dutín predstavuje omnoho nákladnejší spôsob ako vytváranie soľných dutín.

Podzemné vodopriepustné horniny umožňujú tok podzemnej vody pozdĺž vrstvy. Kvôli obmedzeniu prietoku z vodopriepustnej vrstvy musí byť zapúzdrená s vrstvou malej alebo žiadnej priepustnosti. Vodopriepustná podzemná vrstva nemá pevnú hĺbku a preto v jej zvýšených oblastiach môže byť zachytený vzduch bez zamedzenia toku vody (obr. 30c) [25].

V súčasnosti je z geologického pohľadu výskyt soľných pňov a využiteľnosti veternej energie vyhodnotených niekoľko potenciálnych oblastí v Európe (obr. 31) [46].



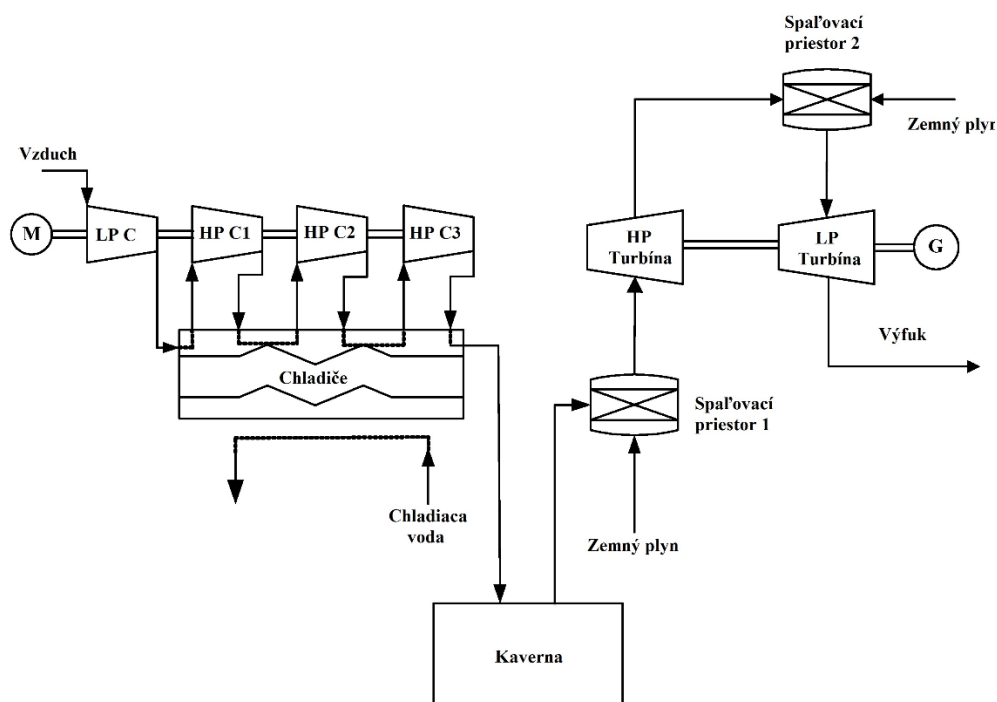
Obr. 31 V ohraničených oblastiach prebieha výskum využitia CAES [46]

## 4.2 AKUMULAČNÉ SYSTÉMY VO SVETE

Napriek komerčnej zvládnutosti CAES sú na celom svete sprevádzkované len dva veľkoobjemové systémy: Huntorf v Nemecku a McIntosh, Alabama v USA. Tieto dve zariadenia nepretržite vykazovali dobré prevádzkové výsledky so začiatočnou 91,2 % a prevádzkovou 99,5 % spoľahlivosťou [47]. Medzi ďalšie plánované projekty patria Norton v Ohio, Adele v Nemecku, Larne v Severnom Írsku a Apex Bethel v Texase. Projekt CAES v energetickom parku v Iowe (ISEP) bol zrušený, kvôli pomalému prúdeniu vzduchu cez vodopriepustné vrstvy [51].

### 4.2.1 Huntorf

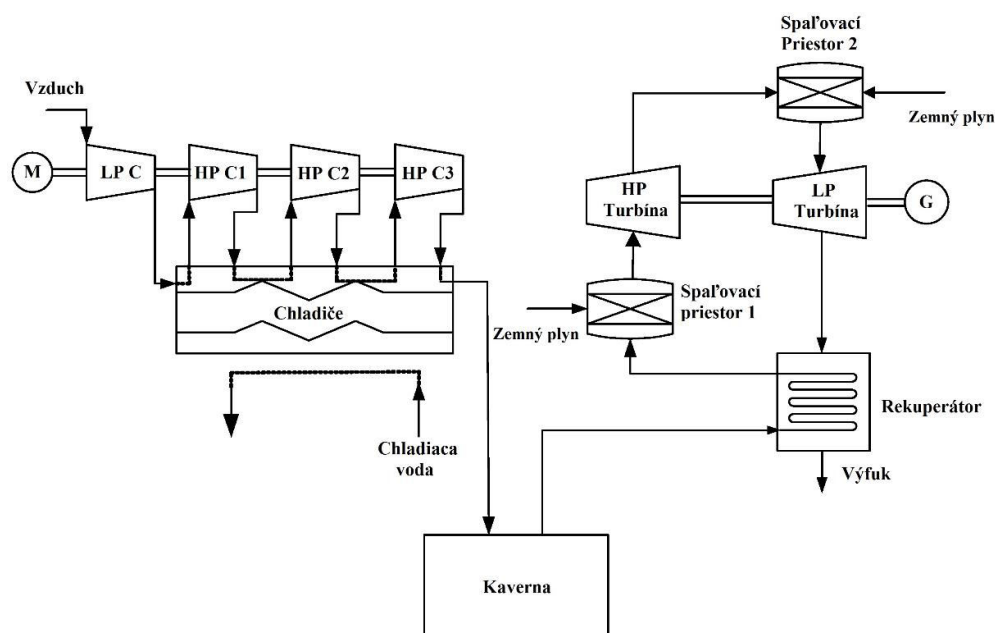
Zariadenie CAES v Huntorfe (obr. 32) je v prevádzke od roku 1978 a je najstarším zariadením tohto druhu. Zásobník zariadenia predstavuje solnú dutinu, nachádza sa 600 m pod povrchom zeme a má objem 310 000 m<sup>3</sup>. Malá kapacita zásobníka značne obmedzuje operačnú flexibilitu zariadenia, ktoré je prevádzkované na báze denného cyklu s osem hodinovým nabíjaním. Maximálny tlak 10 MPa v zásobníku sa dosahuje použitím elektrických kompresorov s výkonom 60 MW. Pri plnom zaťažení má zariadenie výkon 321 MW/642 MWh. Účinnosť zariadenia je okolo 42 % [1].



Obr. 32 Schéma konvenčného zariadenia CAES (Huntorf): M-Motor, C- Kompresor, LP-Nízkotlaková časť, HP-Vysokotlaková časť, G-Generátor [48]

### 4.2.2 McIntosh

Od roku 1991 je v prevádzke zariadenie v meste McIntosh. Zásobník zariadenia, rovnako ako v Huntorfe, je v podobe solnej dutiny a má kapacitu 500 000 m<sup>3</sup>. Nachádza sa 450 m pod povrchom zeme a stlačený vzduch v nej dosahuje tlak 7,5 MPa. Zariadenie využíva rekuperátor k opätovnému využitiu tepelnej energie z turbíny (obr. 33) [1]. Vypočítaná účinnosť rekuperácie je 70 % [49]. Tým sa dosahuje nižšia spotreba paliva (o 22-25 %) a zvyšuje sa účinnosť zariadenia (na cca 54 %). Inštalovaný výkon tohto zariadenia predstavuje 110 MW/2860 MWh [47].



Obr. 33 Schéma zariadenia CAES využívajúca rekuperátor (McIntosh) [48]

### 4.2.3 Norton

Projekt Norton bol schválený v roku 2001 a mal poskytovať výkon 800 MW (s predbežnými plánmi rozšírenia na 2700 MW (9x300 MW)). Vápencovú baňu spoločnosť vlastní od roku 1999, jej kaverna má objem 9 600 000 m<sup>3</sup> a nachádza sa približne 680 m pod povrchom zeme. Plánovaný prevádzkovaný tlak predstavuje 5,5-11 MPa. V roku 2012 bol projekt pozastavený, kvôli nízkej cene elektriny a nedostatočného dopytu po nej [46], [50].

### 4.2.4 APEX Bethel

Výstavba CAES APEX Bethel v Texase bola schválená v roku 2013 a predpokladaný termín odovzdania je rok 2020. Zariadenie patrí medzi AA-CAES (kap. 4.4.1) a bude na kompresiu využívať energiu z veternej elektrárne mimo energetických špičiek. Pozostáva z dvoch expanzných turbosústrojov, každý s výkonom 158 MW a celkovým výkonom 317 MW/ 30 000 MWh. Bude využívať už existujúcu soľnú kavernu, ktorá slúžila na skladovanie zemného plynu. Vysoký tlak v kaverne (13,1-19,5 MPa) bol navrhnutý kvôli použitiu troch spaľovacích turbín na turbosústroj. Vypočítaná účinnosť rekuperácie predstavuje cca 90 % [49].

### 4.2.5 Adele

Výstavba prvého veľkokapacitného demonštračného projektu Adele v Strassfurte, Nemecko bola zahájená v roku 2013. Inštalovaný výkon je naplánovaný na 200 MW/ 1000 MWh. Projekt bude využívať technológiu AA-CAES (kap. 4.3.2). Počíta sa pri ňom s účinnosťou rekuperácie približne 90 % a celkovou účinnosťou približne 70 %. Kompresný režim bude napájaný veternou energiou, počas ktorého sa vzduch ohreje na cca 600 °C. Teplo sa odovzdá tepelnému zásobníku TES (výška zásobníka 40 m) a vzduch približne o teplote 40 °C prúdi do kaverny (tlak do 10 MPa). Predpokladané dokončenie je v roku 2020 [53].

### 4.2.6 Larne

Projekt v Larne, Severnom Írsku bol oznámený v roku 2013 a jeho plánovaný inštalovaný výkon je 330 MW/1980 MWh. Zásobníky vzduchu sú v podobe dvoch soľných kavern, ktoré sa nachádzajú v hĺbke 1500-1700 m a tlak v nich dosiahne 19,3 MPa. Udaná veľkosť kavern je približne 150x60 m. Vypočítaná účinnosť rekuperácie je cca 90 %. Projekt v roku 2016 podporila Európska únia grantom v sume 8,28 miliónov eur [52], [22].

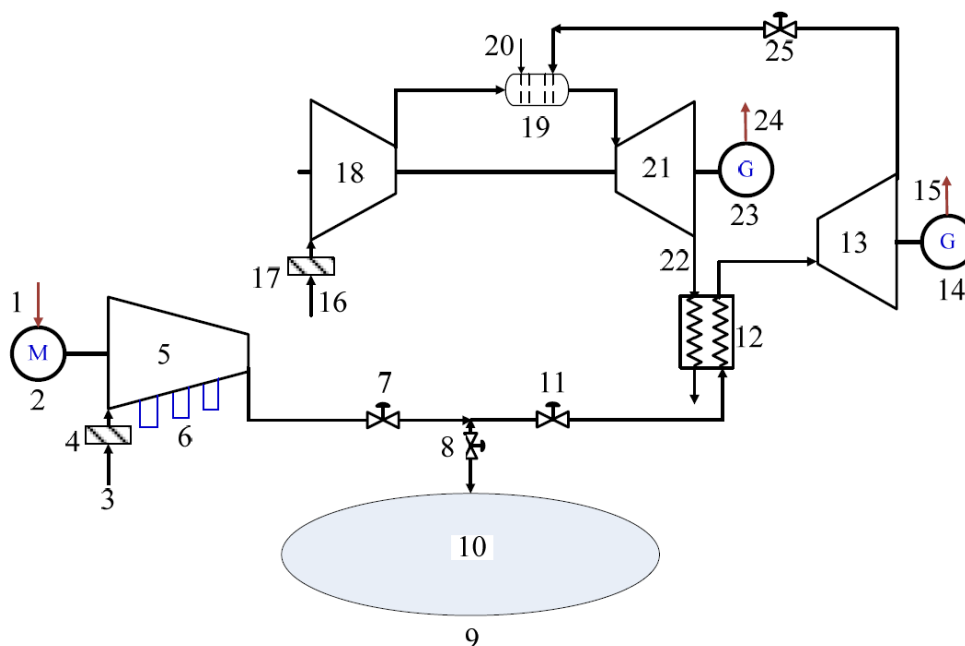
## 4.3 VÝSKUM A VÝVOJ

Komerčné CAES pôsobia niekoľko desaťročí, avšak sprevádzkované veľkokapacitné zariadenia sú založené na konvenčných technológiách plynových turbín. Hlavnými prekážkami pri implementácii sú vhodné kaverny a spoliehanie sa na fosílna palivá. Moderné efektívnejšie systémy znižujú alebo odstraňujú potrebu paliva pomocou tepelných úložísk (TES) alebo lepším využitím energie [46]. Typickými príkladmi v rámci výskumu sú: zlepšené konvenčné CAES, pokročilé adiabatické CAES (AA-CAES) s TES a malorozsahové CAES s vyrobenými zásobníkmi [1].

### 4.3.1 Zlepšené konvenčné CAES

V zlepšenom konvenčnom CAES (obr. 34) sa počas kompresie a po nej používajú medzichladiče. Ohrievače sú inštalované pred vstupom do turbín a rekuperátor je použitý na predhrievanie vzduchu prostredníctvom zbytkového tepla z výfukových plynov. Využitý v projekte McIntosh (kap. 4.2.2).

Pri ďalšom zlepšenom konvenčnom CAES skombinovanom s plynovou turbínou (obr. 34) je stlačený vzduch z kaverny ohrievaný s výfukovými plynmi z plynovej turbíny. Následne expanduje vo vysokotlakovej turbíne a odtiaľ prúdi do spaľovacej komory, kde sa zmiešava s palivom. Celková možná účinnosť je okolo 70 % [1].

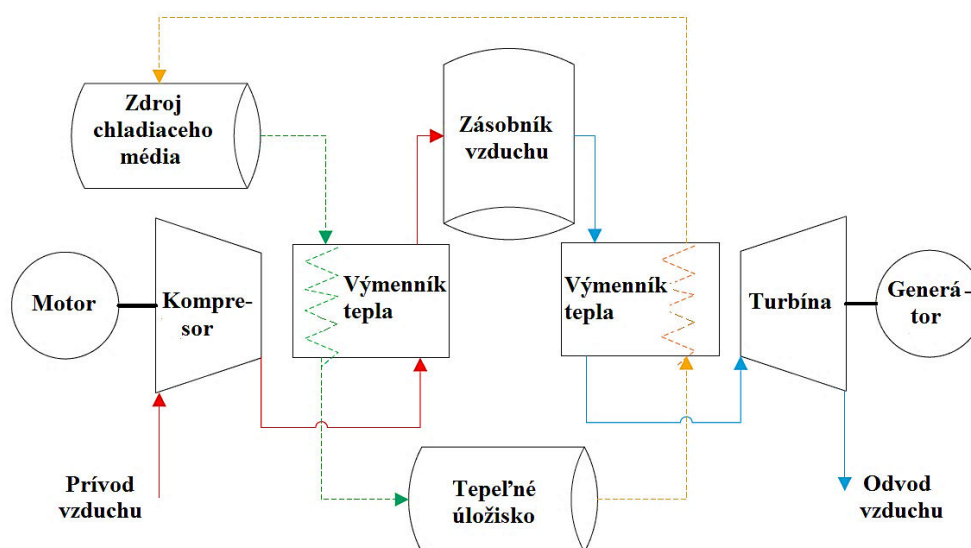


1 15 a 24-Elektrina, 2-Motor, 3 a 16-Vzduch, 4 a 17-Filter, 5 a 18-Kompresor, 6-Medzichladič, 7 8 11 a 25-Ventil, 9-Kaverna, 10-Stlačený vzduch, 12-Rekuperátor, 13 a 21-Turbína, 14 a 23-Generátor, 19-Spaľovací priestor, 20-Palivo, 22-Výfuk

Obr. 34 Schematický diagram zlepšeného konvenčného CAES kombinovaného s plynovou turbínou [1]

### 4.3.2 AA-CAES

Pokročilé adiabatické CAES (AA-CAES) majú v sebe integrovaný subsystém skladovania tepelnej energie (TES) (obr. 34). Predpokladá sa dosiahnutie vyššej efektívnosti bez spaľovacieho procesu (s nulovými emisiami uhlíka). Pri tradičných CAES je teplo pri kompresii vypúšťané do atmosféry a vzduch vypúšťaný z kaverny do spaľovacej turbíny sa musí ohrievať. Pri AA-CAES je teplo po kompresii akumulované prostredníctvom výmenníka do TES. Pred vstupom do turbíny sa vzduch z kaverny ohrieva prostredníctvom výmenníka a tepla z TES. Týmto spôsobom sa dosahuje vyššia účinnosť ako pri tradičných zariadeniach [54]. Počiatočné náklady na tento druh zariadení sú vyššie o 20-30 % [1]. Celková účinnosť má dosiahnuť približne 70 % [47].



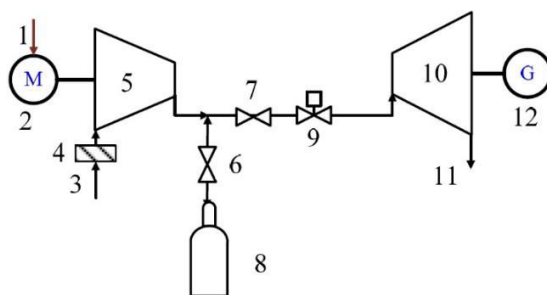
Obr. 34 Schéma AA-CAES [44]

Možným variantom je úprava návrhu veterných elektrární k priamemu stáčeniu vzduchu pomocou mechanického spojenia. Bez premeny formy energie je možnosť dosiahnutia vyššej účinnosti [54].

### 4.3.3 Malorozsahové CAES

Malorozsahové CAES (obr. 35) (do 10 MW) s vyrobenými zásobníkmi nie sú závislé na geologických podmienkach a tým predstavujú adaptívnejšie riešenie. V porovnaní s batériovými úložiskami sú technicky jednoduchšie, majú nízku degradáciu komponentov, vysokú spoľahlivosť, malé náklady na údržbu počas životnosti zariadení, dlhšiu životnosť a môžu byť považované za alternatívne riešenie pre aplikácie záložných zdrojov. S tlakom 30 MPa v tlakových zásobníkoch objemu 24 m<sup>3</sup> môžu fungovať ako záložný zdroj jeden rok, pričom sa počíta so štyrmi nabitiami. Tieto zariadenia nedisponujú rekuperačnými jednotkami a ich účinnosť je nižšia ako olovených akumulátorov [1].





1-Elektrina, 2-Motor, 3-Vzduch, 4-Filter,  
5-Kompresor, 6 7 a 9-Ventil, 8-Zásobník,  
10-Expandér, 11-Výfuk, 12-Generátor

Obr. 35 Schéma malorozsahového CAES [1]



## 5 SIMULÁCIA CHODU JEDNODUCHÉHO MOTORA NA STLAČENÝ VZDUCH

Simulácia chodu pneumatického motora bude prevedená prostredníctvom ukážky základného výpočtu, ktorý nepostihuje komplexnú problematiku v tejto oblasti. Pri simulácii kompresie sa bude kvôli tepelnej degradácii maziva počítať s maximálnou teplotou vzduchu 200 °C pri výtlaku z kompresora. Naopak pri expanzii je potrebné predísť napríklad zamrznutiu výfukových častí, zvýšeniu viskozity maziva a vyselektovaniu zložiek maziva kvôli nízkym teplotám. Predpokladá sa neklesnutie minimálnej teploty pod 3,5 °C.

Otáčky  $f$  sa pre kompresor a motor sa volia zhodne a sú rovnako ako polytropický exponent  $n$ , Poissonova konštanta  $\kappa$  a merná plynová konštanta  $r$  v priebehu celej výpočtovej časti nemenné:

$$f = 50 \text{ s}^{-1} \quad n = 1,3 \quad \kappa = 1,402 \quad r = 287,04 \text{ J/kg.K}$$

Objem valca kompresora a pneumatického motora sa volí zhodne 0,01 m<sup>3</sup> a veľkosť škodlivého priestoru je stanovená na 5 % z objemu valcov. Pri výpočte sa uvažuje s barometrickým tlakom 100 000 Pa.

### 5.1 KOMPRESIA

Zvolené vstupné parametre vzduchu, podľa podmienky minimálnej a maximálnej teploty (15 °C a 200 °C), nasávaného z atmosféry (výpočet a značenie podľa kap. 2.2.2):

$$\begin{aligned} t_1 &= 15 \text{ °C} & V_1 &= 0,01 \text{ m}^3 \\ t_2 &= 200 \text{ °C} & V_3 &= 0,05 \cdot V_1 = 0,0005 \text{ m}^3 \\ p_1 &= 100\,000 \text{ Pa} \\ p_4 &= p_1 \\ p_3 &= p_2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Z požiadavky maximálnej teploty  $t_2$  určíme tlak po kompresii

$$p_2 = p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 857\,658,29 \text{ Pa} , \quad (5.2)$$

a objem po kompresii plynu zo škodného priestoru

$$V_4 = \frac{V_3}{\left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{1}{n}}} = 0,002612 \text{ m}^3 . \quad (5.3)$$

Veľkosť nasávaného objemu

$$V_{41} = V_1 - V_4 = 0,007 \text{ m}^3 . \quad (5.4)$$

Práca kompresora

$$A_K = \frac{n}{n-1} p_1 V_{41} \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) = -2\,055,54 \text{ J} . \quad (5.5)$$

Objem po kompresii

$$V_2 = \frac{V_1}{\left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}} = 0,001915 \text{ m}^3 . \quad (5.6)$$

Výpočet hmotnosti a hmotnostného prietoku zo stavovej rovnice

$$m = \frac{p_1 V_{41}}{r T_1} = 0,009 \text{ kg} , \quad (5.7)$$

$$\dot{m} = m f = 0,447 \frac{\text{kg}}{\text{s}} . \quad (5.8)$$

Spotrebovaný príkon kompresora

$$P_K = A_K f = -102\,777,14 \text{ W} . \quad (5.9)$$

Odvedené teplo a odvedené teplo za sekundu

$$Q_K = \frac{\kappa - n}{n(\kappa - 1)} A_K = -401,19 \text{ J} , \quad (5.10)$$

$$\dot{Q}_K = Q_K f = -20\,059,83 \text{ W} . \quad (5.11)$$

## 5.2 AKUMULÁCIA V ZÁSObNÍKU

Vstupné parametre vzduchu po kompresii s predpokladanou tepelnou účinnosťou akumulácie 90 %:

$$\begin{array}{lll} t_1 = 15 \text{ } ^\circ\text{C} & c_{p(t=190\text{ } ^\circ\text{C})} = 1\,023,08 \text{ J/kg.K} & m = 0,009 \text{ kg} \\ t_2 = 200 \text{ } ^\circ\text{C} & \eta = 0,9 & \dot{m} = 0,447 \text{ kg/s} \end{array}$$

Výpočet výstupnej teploty zo zásobníka

$$t_3 = t_1 + (t_2 - t_1)\eta = 181,5 \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (5.12)$$

Tepelné straty v zásobníku

$$Q_Z = m c_p (t_3 - t_2) = -169,06 \text{ J} , \quad (5.13)$$

$$\dot{Q}_Z = \dot{m} c_p (t_3 - t_2) = -11\,440,8 \frac{\text{J}}{\text{s}} . \quad (5.14)$$

## 5.3 EXPANZIA (PNEUMATICKÝ MOTOR)

Zvolené vstupné parametre motora a vypočítané hodnoty z kap. 5.1 a 5.2 (výpočet a značenie podľa kap. 2.3.1):

$$\begin{array}{ll} t_1 = 181,5 \text{ } ^\circ\text{C} & V_2 = 0,01 \text{ m}^3 \\ t_{2\text{MIN}} = 3,5 \text{ } ^\circ\text{C} & V_4 = 0,05 \cdot V_2 = 0,0005 \text{ m}^3 \\ p_1 = 857\,658,288 \text{ Pa} & m = 0,009 \text{ kg} \\ p_2 = 100\,000 \text{ Pa} & \dot{m} = 0,447 \text{ kg/s} \\ p_4 = p_1 & \\ p_3 = p_2 & \end{array} \quad (5.15)$$

Výpočet teploty vzduchu po expanzii

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 276,88 \text{ K} \rightarrow t_2 = 3,73 \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (5.16)$$

Objem po vtlačení vzduchu, z ktorého nastáva expanzia je

$$V_1 = V_2 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,00192 \text{ m}^3 . \quad (5.17)$$

Veľkosť objemu po vtlačení bez škodlivého priestoru

$$V_{41} = V_1 - V_4 = 0,001 \text{ m}^3 . \quad (5.18)$$

Práca motora bez tepelných strát počas kompresie a akumulácie

$$A_M = \frac{n}{n-1} m r T_1 \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) = 1\,975,17 \text{ J} . \quad (5.19)$$

Privedené teplo a tepelný tok počas polytropickej expanzie

$$Q_M = \frac{\kappa-n}{n(\kappa-1)} A_M = 385,51 \text{ J} , \quad (5.20)$$

$$\dot{Q}_M = Q_M f = 19\,275,5 \text{ J} . \quad (5.21)$$

Výkon pneumatického motora

$$P_M = A_M f = 98\,758,59 \text{ W} . \quad (5.22)$$

Účinnosť vychádzajúca z tepelných strát v zásobníku

$$\eta = \frac{P_M}{|P_K|} = 0,9609 \rightarrow 96,09 \% . \quad (5.23)$$

Výsledná účinnosť procesu pri predpoklade dohrievania pneumatického motora

$$\eta_c = \frac{P_M}{|P_K| + \dot{Q}_M} = 0,8091 \rightarrow 80,91 \% . \quad (5.24)$$

Jednoduchý rozbor poukázal na potrebu minimalizovania tepelných strát pri skladovaní stlačeného vzduchu, nutnosť prívodu tepla pri expanzii vzduchu a ich súvislosť s celkovou účinnosťou.

## ZÁVER

Nárast výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov zväčšuje problém medzi časom maximálnej výroby a spotreby elektriny, čo je dôvodom akumulácie energie. Výstavba nových elektrární je zapríčinená aj rastúcim trendom odberu elektriny. Z ekonomického hľadiska by priaznivejšia kontinuálna prevádzka elektrární mohla mať za následok zvyšujúce sa množstvo vyrobenej elektrickej energie mimo energetických špičiek. Mohlo by to zvýšiť potrebu sprevádzkovania nových úložísk elektrickej energie. Elektrinu z obnoviteľných zdrojov energie je z pohľadu kvality elektrickej energie účelné dodávať do elektrickej siete cez úložiská elektrickej energie.

Medzi hlavné výhody akumulačných systémov na stlačený vzduch (CAES) patrí práve využitie vzduchu ako akumulačného média, schopnosť akumulácie veľkého množstva energie (desiatky GWh) pri relatívne vysokom výstupnom výkone (stovky MW), relatívne malý zásah do povrchovej časti zeme, plná prevádzka zo studeného štartu do 15 minút a z 50 % výkonu do troch minút. Z pohľadu celkovej účinnosti a nutnosti ďalšieho vývoja nie je akumulácia veľkého množstva energie prostredníctvom CAES stále konkurencieschopná v porovnaní s prečerpávacími vodnými elektrárnami. Doposiaľ inštalované veľkokapacitné CAES majú celkové účinnosti približne 42 % v Huntorfe a cca 54 % dosahuje zariadenie v meste McIntosh. Avšak nevhodné geografické podmienky k vybudovaniu prečerpávacích vodných elektrární a vhodné geologické podmienky k vytvoreniu kavern môžu mať v budúcnosti pri určitých lokalitách za následok širšie využitie práve moderných CAES. Kvôli rýchlejšiemu sprevádzkovaniu a spoľahlivosti kavern sa vhodným úložiskom stlačeného vzduchu javia rokmi overené podzemné zásobníky zemného plynu, ktoré plánuje využiť aj projekt APEX Bethel v Texase. Vytváranie kavern uprostred solných pŕnov je napriek svojej časovej náročnosti nízkonákladovým riešením. Vysoká prevádzková spoľahlivosť (okolo 99,5 %) a dlhá prevádzková schopnosť (Huntorf už 40 rokov a McIntosh cca 26 rokov) doteraz postavených zariadení je dôkazom zvládnutia technológie.

Zlepšené konvenčné CAES môžu kombinovať využitie okrem spaľovacej aj expanznú turbínu. Vyššia účinnosť môže byť dosiahnuteľná okrem rekuperácie tepelnej energie v okruhu, a tým šetrením paliva aj kombináciou výroby elektrickej a tepelnej energie.

Pri pokročilých adiabatických CAES sa predpokladá dosiahnutie celkovej účinnosti približne 70 %. Aj kvôli pridanej technológii tepelných úložísk sa navýšenie počiatkových nákladov v porovnaní s konvenčnými zariadeniami odhaduje o 20-30 %. Kvôli prevádzkovému procesu, bez spaľovania paliva, založenom na expanzii vzduchu ide o prevádzku bez emisii uhlíka. Z ekologického pohľadu sa javí najperspektívnejšie práve tento druh zariadení v kombinácii s obnoviteľnými zdrojmi energie.

Sprevádzkovanie zariadení vo výstavbe bude ďalším míľnikom pre túto technológiu, ktoré prinesie skutočné hodnoty celkových účinností a tým aj rentabilnosť tejto technológie.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] ZOBAA, Ahmed Faheem. 2013. ENERGY STORAGE – TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS. Novi Sad: InTech. ISBN 978-953-51-0951-8.
- [2] SMITH, Steven C., P.K. SEN a Benjamin KROPOSKI. Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century [online]. IEEE, 2008, , 1-8 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1109/PES.2008.4596436. ISBN 978-1-4244-1905-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4596436/>
- [3] MESÁROŠ, Alexander. Akumulácia elektrickej energie v elektrickej sieti. *ELEKTROENERGETIKA*. Technical University of Košice, ©2012, 5(2), 35. ISSN 1337-6756. Dostupné také z: <http://jeen.fei.tuke.sk/index.php/jeen/article/view/268/240>
- [4] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010, 296 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [5] HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Energie pro 21. století*. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-010-0817-7.
- [6] CHEN, Haisheng, Thang Ngoc CONG, Wei YANG, Yongliang LI, Yulong DING a Chunqing TAN. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science* [online]. 0903, 19(3), 291-312 [cit. 2017-02-26]. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014. ISSN 10020071. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X>
- [7] Energy Storage Association. In: *Fundamental idea of the energy storage* [online]. Energy Storage Association: Washington, 2012 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/source/html/42273/media/image1.png>
- [8] MCDOWALL, J. High power batteries for utilities - the world's most powerful battery and other developments. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004*. IEEE, 2004, , 2034-2037. DOI: 10.1109/PES.2004.1373234. ISBN 0-7803-8465-2. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1373234/>
- [9] Electrical energy storage. *Power Engineering Journal* [online]. 1998, 12(4), 177-181 [cit. 2017-02-26]. DOI: 10.1049/pe:19980412. ISSN 09503366. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/709361/>
- [10] IBRAHIM, H., A. ILINCA a J. PERRON. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2008, 12(5), 1221-1250 [cit. 2017-02-27]. DOI: 10.1016/j.rser.2007.01.023. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238>
- [11] MOHD, A., E. ORTJOHANN, A. SCHMELTER, N. HAMSIC a D. MORTON. Challenges in integrating distributed Energy storage systems into future smart grid. In: *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on* [online]. Bolton: IEEE, 0806, s. 1627-1632 [cit. 2017-02-26]. DOI: 10.1109/ISIE.2008.4676896. ISBN 9781424416653. ISSN 2163-5145. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4676896/>

- [12] SMITH, Steven C., P.K. SEN a Benjamin KROPOSKI. *Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system*. In: . s. -. DOI: 10.1109/PES.2008.4596436. ISBN 10.1109/PES.2008.4596436. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4596436/>
- [13] IBRAHIM, H., A. ILINCA a J. PERRON. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2008, **12**(5), 1221-1250 [cit. 2017-02-27]. DOI: 10.1016/j.rser.2007.01.023. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238>
- [14] Sample of California Hourly Demand and Solar and Wind Production. In: *California ISO* [online]. California: California Independent System Operator., 2013 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.caiso.com/>
- [15] THOMAS J. DOLAN, EDITOR, Thomas J. Dolan, editor a CO-AUTHORS: JANA BROTKOVÁ.[AND MORE]. *Magnetic fusion technology* [online]. Aufl. 2013. London: Springer London, 2013 [cit. 2017-03-08]. ISBN 978-144-7155-560. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=U-i3BAAAQBAJ&lpg=PR1&dq=Magnetic%20fusion%20technology&hl=sk&pg=PA3#v=onepage&q=Magnetic%20fusion%20technology&f=false>
- [16] MAREŠ, Jan a Martin LIBRA. Akumulace elektrické energie. *ELEKTRO* [online]. Praha: ČZU, 2011, 6-10 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>
- [17] Dôvody a možnosti akumulácie elektrickej energie v súvislosti s rozšírením obnoviteľných zdrojov energie a porovnanie dostupných technológií [online]. Komárno: PROJEKTSTAV Komárno, 2013 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.gesc.sk/wp-content/uploads/2014/09/Dovody-a-moznosti-akumulacie-elektrickej-energie-v-suvislosti-s-rozsirenim-obnovitelnych-zdrojov-energie-a-porovnanie-dostupnych-technologii.pdf>
- [18] GRIDFLEX PROPOSES 300MW ENERGY STORAGE PROJECT FOR HAWAII. In: *Official Website of the Aloha State* [online]. Hawaii: State of Hawaii, 2010 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.hawaiicleanenergyinitiative.org/gridflex-proposes-300mw-energy-storage-project-for-hawaii/>
- [19] MCLEAN, Eoin a Derek KEARNEY. An Evaluation of Seawater Pumped Hydro Storage for Regulating the Export of Renewable Energy to the National Grid. In: *Energy Procedia* [online]. 2014, **46**, s. 152-160 [cit. 2017-03-13]. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.01.168. ISSN 18766102. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214001842>
- [20] Storing energy at sea. *ENERGIE SPEICHER* [online]. Karlsruhe: FIZ, 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: [http://forschung-energiespeicher.info/en/projektschau/gesamtlste/projekt-einzelansicht/95/Kugelpumpspeicher\\_unter\\_Wasser/](http://forschung-energiespeicher.info/en/projektschau/gesamtlste/projekt-einzelansicht/95/Kugelpumpspeicher_unter_Wasser/)

- [21] Example of cylindrical flywheel rotor assembly. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/Example\\_of\\_cylindrical\\_flywheel\\_rotor\\_assembly.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/Example_of_cylindrical_flywheel_rotor_assembly.png)
- [22] DOE Global Energy Storage Database. *Sandia National Laboratories* [online]. Albuquerque: Sandia Corporation, 2016 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.energystorageexchange.org/projects>
- [23] KRATSCHMER, B. *Akumulace elektrické energie z OEZ*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 78 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=67522](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67522)
- [24] Energy Storage Method Using Superconducting Phenomenon. *MEIJI UNIVERSITY* [online]. Tokio: Meiji University, 2015 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.meiji.ac.jp/cip/english/frontline/nomura/index.html>
- [25] SØRENSEN, Bent. *Renewable energy: its physics, engineering, use, environmental impacts, economy, and planning aspects*. 3rd ed. Boston: Elsevier Academic Press, c2004. ISBN 01-265-6153-2. Dostupné také z: <http://site.iugaza.edu.ps/wp-content/uploads/00%20Renewable%20Energy%20book.pdf>
- [26] ŠPIČÁK, Ladislav. *Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 58s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=19002](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19002)
- [27] GOUBARD-BRETESCHÉ, Nicolas, Olivier CROSNIER, Frédéric FAVIER a Thierry BROUSSE. Improving the Volumetric Energy Density of Supercapacitors. In: *Electrochimica Acta*. Nantes: Elsevier, 2016, **206**, s. 458-463. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.01.171. ISSN 00134686. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013468616301700>
- [28] PETRICCA, Luca, Per OHLCKERS a Xuyuan CHE. The Future of Energy Storage Systems. *Energy Storage - Technologies and Applications* [online]. InTech, 2013, s. 119 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.5772/52413. ISBN 978-953-51-0951-8. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/the-future-of-energy-storage-systems>
- [29] DVOŘÁK, Petr. Superkondenzátory. *TZB-info*. Ústav Elektrotechnologie, FEKT VUT v Brně, 2010. Dostupné také z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnoviteln%C3%A1-energie/6710-superkondenzatory>
- [30] Capacitor, supercapacitor and battery diagram. *SupercapTech.com* [online]. SupercapTech.com, 2016 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <https://www.supercaptech.com/no-supercapacitor-is-not-a-capacitor>
- [31] DVOŘÁK, Petr. Akumulace elektřiny. *TSB-info*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2011. Dostupné také z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elekriny>
- [32] BARBOUR, Edward. *Energy Storage Sense* [online]. Birmingham [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://energystoragesense.com/>



- [33] Lead/acid batteries. In: *DoITPoMS* [online]. Cambridge: University of Cambridge [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/figures/Lead\\_acid.png](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/figures/Lead_acid.png)
- [34] KRIVIK, Petr a Petr BAC. Electrochemical Energy Storage. In: *Energy Storage - Technologies and Applications* [online]. InTech, 2013 [cit. 2017-03-24]. DOI: 10.5772/52222. ISBN 978-953-51-0951-8. Dostupné z: [http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/electrochemical\\_energy\\_storage](http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/electrochemical_energy_storage)
- [35] The World Biggest Lithium-Ion Energy Storage Facility. *CleanTechnica* [online]. Sustainable Enterprises Media, 2017 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2017/02/27/worlds-biggest-lithium-ion-energy-storage-facility/>
- [36] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [37] KOHUT, Vojtěch. VÝROBA STLAČENÉHO VZDUCHU: Energetické parametry kompresorů. In: *UWB Plzeň* [online]. Brno: VUT FSI [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: [http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old\\_web/files/projekty/enazp/14/IUT/070\\_Vyroba\\_stlaceneho\\_vzduchu\\_-\\_Kohut\\_-\\_Pl.pdf](http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/files/projekty/enazp/14/IUT/070_Vyroba_stlaceneho_vzduchu_-_Kohut_-_Pl.pdf)
- [38] ŠTETINA, Josef. *TERMOMECHANIKA* [online]. Brno: VUT, 2016 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/0B7nmoC7ND2vvRGt1SjNRQ180T0k>
- [39] VACEK, Tomáš. *Návrh a konstrukce jednoúčelového stroje pro montáž sestavy stavěcího šroubu* [online]. UTB Zlín, 2013 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24600/vacek\\_2013\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24600/vacek_2013_dp.pdf?sequence=1)
- [40] ELLIOTT, Brian S. *Compressed air operations manual* [online]. S.l.: Mcgraw-Hill Professional, 2006 [cit. 2017-04-17]. ISBN 978-007-1491-846. Dostupné z: <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/0B7nmoC7ND2vvTklfemU0MTBMQjg>
- [41] CAGI. *Compressed Air & Gas Handbook*. Seventh ed. Cleveland, 2016. Dostupné také z: <http://www.cagi.org/education/handbook.aspx>
- [42] VÝHODY PNEUMATICKÉHO NÁŘADÍ OPROTI ELEKTRICKÉMU NÁŘADÍ. In: *DEPRAG* [online]. Lázně Bělohrad: DEPRAG CZ [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: [http://www.deprag.cz/files/products/ostatni\\_dokumenty/Vyhody%20pneu%20elektr.pdf](http://www.deprag.cz/files/products/ostatni_dokumenty/Vyhody%20pneu%20elektr.pdf)
- [43] Bethel Energy Center. *Apex CAES* [online]. Houston: APEX CAES, 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.apexcaes.com/bethel-energy-center>
- [44] MILEWSKI, Jaroslaw, Krzysztof BADYDA a Lukasz SZABLOWSKI. Compressed Air Energy Storage Systems. *Journal of Power Technologies* [online]. 2016, vol. 96, no. 4, s. 245-260. ISSN 20834187. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1858094386?accountid=17115>

- [45] KENNEDY, Carl. *INTEGRATION OF RENEWABLES INTO OFF-GRID POWER SYSTEMS*. Sheffield, 2015. Dostupné také z: [http://static1.squarespace.com/static/53ce14b9e4b03fc272f43709/t/5587de15e4b0617eda5fb4a0/1434967573713/Carl\\_Kennedy\\_Mini\\_Project.pdf](http://static1.squarespace.com/static/53ce14b9e4b03fc272f43709/t/5587de15e4b0617eda5fb4a0/1434967573713/Carl_Kennedy_Mini_Project.pdf)
- [46] SUCCAR, Samir a Robert H. WILLIAMS. *Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, And Applications For Wind Power*. Princeton: PRINCETON UNIVERSITY, 2008. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1129/ML11294A619.pdf>
- [47] LUO, Xing, Jihong WANG, Mark DOONER a Jonathan CLARKE. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. In: *Applied Energy* [online]. 2015, **137**, s. 511-536 [cit. 2017-04-24]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914010290>
- [48] LIU, Wenyi, Linzhi LIU, Luyao ZHOU, Jian HUANG, Yuwen ZHANG, Gang XU a Yongping YANG. Analysis and Optimization of a Compressed Air Energy Storage—Combined Cycle System. In: *Entropy*. 2014, **16**(6), s. 3103-3120. DOI: 10.3390/e16063103. ISSN 1099-4300. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1099-4300/16/6/3103/>
- [49] PSD Greenhouse Gas Permit Statement of Basis for Apex Bethel Energy Center. Dallas: US EPA, 2013, (PSD-TX-104511-GHG). Dostupné také z: <https://archive.epa.gov/region6/6pd/air/pd-r/ghg/web/pdf/apex-bethel-sob.pdf>
- [50] Norton CAES Facility. *HYDROdynamics Group* [online]. Edmonds: The Hydrodynamics Group, 2000 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.hydrodynamics-group.net/norton.html>
- [51] *Scrapped Iowa project leaves energy storage lessons* [online]. MIDWEST ENERGY NEWS, 2012 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://midwestenergynews.com/2012/01/19/scrapped-iowa-project-leaves-energy-storage-lessons/>
- [52] Gaelectric submits planning application for 330MW compressed air storage system in Northern Ireland. *Energy Storage NEWS* [online]. London: Solar Media, 2016 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/news/gaelectric-submits-planning-application-for-330mw-compressed-air-storage-sy>
- [53] Compressed Air Energy Storage (CAES). *Neural Energy Consulting* [online]. 2016 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.neuralenergy.info/2009/06/caes.html>
- [54] Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES). *ESA* [online]. Washington: Energy Storage Association, 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://energystorage.org/advanced-adiabatic-compressed-air-energy-storage-aa-caes>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Jednotka	Veličina
$a$	$\text{J.kg}^{-1}$	Merná práca
$A$	J	Práca
$a_t$	$\text{J.kg}^{-1}$	Merná technická práca
$A_t$	J	Technická práca
$c$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Merná tepelná kapacita
$C$	F	Kapacita kondenzátora
$\varepsilon_0$	-	Pomerná veľkosť škodlivého priestoru
$E_{el}$	J	Elektrická energia
$E_k$	J	Kinetická energia
$E_{mg}$	J	Magnetická energia cievky
$f$	$\text{s}^{-1}$	Otáčky
$h$	$\text{J.kg}^{-1}$	Merná entalpia
$I$	$\text{kg.m}^2$	Moment zotrvačnosti
$I$	A	Elektrický prúd
$L$	H	Indukčnosť
$m$	kg	Hmotnosť
$\dot{m}$	$\text{kg.s}^{-1}$	Hmotnostný tok
$M$	$\text{kg.mol}^{-1}$	Mólová hmotnosť
$n$	-	Polytropický exponent
$n$	mol	Látkové množstvo
$p$	Pa	Tlak
$P$	W	Výkon
$q$	$\text{J.kg}^{-1}$	Merné teplo
$Q$	J	Teplo
$\dot{Q}$	$\text{J.s}^{-1} = \text{W}$	Tepelný tok
$r$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Merná plynová konštanta
$s$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Merná entropia
$t$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
$T$	K	Termodynamická teplota
$u$	$\text{J.kg}^{-1}$	Merná vnútorná energia
$U$	V	Elektrické napätie

$\nu$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	Merný objem
$V$	$\text{m}^3$	Objem
$V_{41}$	$\text{m}^3$	Nasávaný objem
$\dot{V}_{41}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Nasávaný objemový tok
$V_m$	$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	Mólový objem
$V_Z$	$\text{m}^3$	Zdvihový objem
$\alpha$	$\text{K}^{-1}$	Teplotná dĺžková rozťažnosť
$\beta$	$\text{K}^{-1}$	Rozpínavosť
$\gamma$	$\text{K}^{-1}$	Teplotná objemová rozťažnosť
$\eta$	-	Účinnosť
$\eta_0$	-	Objemová účinnosť
$\eta_c$	-	Celková účinnosť
$\kappa$	-	Poissonova konštanta
$\omega$	$\text{s}^{-1}$	Uhl'ová rýchlosť

Skratka	Význam
AA-CAES	Pokročilé adiabatické akumulčné systémy na stlačený vzduch
AEE	Akumulácia elektrickej energie
CAES	Akumulčné systémy na stlačený vzduch
EDLC	Elektrochemické dvojvrstvové kondenzátory
ESS	Akumulčné systémy elektrickej energie
FBES	Prietokové batérie
FES	Zotrvačnické úložiská
HES	Palivové články - vodíkové úložiská
ISEP	Energetický park Iowa
OZE	Obnoviteľné zdroje energie
PHS	Prečerpávacie vodné elektrárne
PSB	Polysulfidovo brómové batérie
SES	Superkondenzátory
SMES	Supravodivé magnetické akumulátory
TES	Tepelné úložiská
UPS	Záložný zdroj
VRB	Vanádium redoxné batérie
ZEBRA	Batéria s nulovými emisiami

ZRB	Zinkovo-brómové batérie
-----	-------------------------

## Indexy

Symbol	Stav
1	Vstup
2	Výstup
C	Minimálna teplota
H	Maximálna teplota
K	Pre kompresor
M	Pre motor
MIN	Požiadavka minimálnej teploty
n	Pre polytropický dej
p	Pri konštantnom tlaku
t	Termický
T	Pri konštantnej teplote
v	Pri konštantnom objeme
Z	Pre zásobník

## Fyzikálne konštanty

Veličina	Symbol
Univerzálna plynová konštanta	$R_m = 8314,47 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$